

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**



**Využití termovize při diagnostice prvků  
distribuční sítě**  
Disertační práce

Školitel: doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.

Ostrava 2011

Ing. Miroslav Hrabčík

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Doktorský studijní program:** Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika  
(P2645)

**Studijní obor:** Elektroenergetika (3907V001)

**Autor:** Ing. Miroslav Hrabčík

**Školitel:** doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.

**PROHLÁŠENÍ:**

*Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně.*

*Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě dne 27.9.2011

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ:

*Tímto bych rád vyjádřil velké poděkování svému školiteli doc. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D. za odborné vedení ke zdárnému dokončení této práce.*

*Dále bych rád poděkoval kolegům, rodičům a přítelkyni za podporu a trpělivost, kterou měli při mém studiu.*

## **Abstrakt**

Disertační práce se zabývá problematikou využití termovize v distribučních sítích a ukazuje její praktické použití v provozu. Dále zobrazuje možné výstupy z jednotlivých měření a řeší otázku zpracování naměřených dat. Zaměřuje se na komplikace při použití termovize v běžném provozu. Zabývá se problematikou nastavení kamery, kdy v praxi je občas velice těžké určit, jakou hodnotu nastavovaných parametrů zvolit. Ukazuje emisivitu jako stěžejní parametr pro měření a prakticky se zabývá stanovením tohoto parametru pro některé nejpoužívanější kovy. Ukazuje výsledky z pravidelných měření na jednotlivých prvcích a celcích distribučních sítí, kdy výsledky jsou uchovávány v databázi. Dále zobrazuje zpracování této databáze naměřených dat a jejich pozdější analýzu členěnou do jednotlivých energetických celků. Ukazuje skutečná data, která byla naměřena na distribučních celcích a výsledky jejich rozboru. Tyto výsledky vedou na další problematiku a tou je problematika závadovosti pistolových kotevních svorek. Ta je konzultována s odborníky z praxe a dále simulačně řešena pomocí metody konečných prvků. Jako příklad pro simulace jsou vzaty dvě provedení kotevních svorek a na těchto jsou provedeny simulace v programu Ansys Workbench. Výsledky jsou pak posuzovány individuálně nebo komparačně, záleží na povaze simulace. Tyto simulace jsou prováděny pro analýzu co nejvíce faktorů, které ovlivňují provoz daného typu svorek.

## **Klíčová slova**

Termovize, termokamera, analýza dat, databáze, protokol, emisivita, nastavení parametrů, měření, simulace, modelování, distribuční trafostanice, rozvodna, vedení, kotevní svorka.

## **Abstract**

This dissertation deals with the use of thermography in distribution power networks, it is showed practical use in the operation state. It also includes possible outcomes of individual measurements and tries to solve the issue, what with the measured data after measuring. It focuses on the complications of using thermography in normal operation. It deals with the issue of camera settings, where in practice use is sometimes very difficult to determine the value of adjusted parameters. It shows the emissivity as a very important parameter for measuring and practically dealing with this parameter for some of the most of used metals. It shows the results of regular measurements of individual parts and units of distribution networks, where the results are stored in the database. Further processing of this database shows the measured data and their subsequent analysis articulated in the individual power units. It shows the real data, which was measured at the distribution units and the results of their analysis. These results lead to further problems and this is the problem with pistol dead-end clamps. This issue is discussed with specialist and next it is solved by simulation with using the finite element method. As an example for simulations are taken two versions of dead-end clamps and on these clamps are made simulations in software ANSYS Workbench. The results are assessed individually or comparative, depending on the character of the simulation. These simulations are performed to identify the most factors, which have effect on the operation statue of these clamps.

## **Key word:**

Thermography, thermal camera, data analysis, database of protocols, protocol, emissivity, parameters setting, measurement, simulation, modeling, distribution transformer, substation, high voltage lines, dead-end clamp.

## Obsah:

1	ÚVOD .....	1
2	FYZIKÁLNÍ TEORIE TEPELNÉHO ZÁŘENÍ.....	3
2.1	ZÁŘENÍ A VELIČINY PRO JEHO POPIS .....	3
2.2	OBJEKTY A PROSTŘEDÍ .....	7
2.3	CELKOVÉ ROZDĚLENÍ IR SPEKTRA .....	8
2.4	EMISIVITA .....	10
2.5	DETEKTORY .....	13
2.5.1	KVANTOVÉ DETEKTORY.....	16
2.5.2	TEPELNÉ DETEKTORY .....	19
2.6	TERMOKAMERY.....	23
2.7	SIMULACE .....	26
3	TERMOGRAFICKÁ MĚŘENÍ.....	28
3.1	EMISIVITA .....	28
3.2	OSTATNÍ PARAMETRY .....	29
3.3	DEFINICE STAVU ZAŘÍZENÍ .....	30
3.4	PROTOKOL Z MĚŘENÍ.....	31
4	PROBLÉMY PRAKTICKÉ TERMODIAGNOSTIKY .....	32
4.1	MATERIÁLOVÁ OXIDACE POVRCHŮ MĚŘENÝCH PLOCH .....	32
4.1.1	POPIS VYTVOŘENÝCH PROCEDUR A FUNKCÍ POUŽITÝCH V ROZBORU .....	34
4.1.2	DURAL.....	37
4.1.3	ŽELEZO .....	40
4.1.4	MĚĎ.....	43
4.1.5	MOSAZ .....	46

4.1.6	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KOVŮ.....	49
4.2	MATERIÁLOVÁ SLOŽITOST KONTROLOVANÝCH OBJEKTŮ.....	51
5	ANALÝZA NAMĚŘENÝCH PROTOKOLŮ .....	53
5.1	OBECNÉ INFORMACE O DATABÁZI .....	53
5.2	ÚPRAVA DATABÁZÍ .....	53
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	55
6.1	DISTRIBUČNÍ TRAFOSTANICE.....	55
6.2	ROZVODNY.....	59
6.3	VEDENÍ.....	65
7	ANALÝZA ZÁVADOVOSTI KOTEVNÍCH SVOREK.....	68
7.1	DEFINICE PROBLÉMU .....	68
7.2	MODELOVÁNÍ A SIMULACE PROUDOVÝCH DĚJŮ NA SVORKÁCH .....	70
7.2.1	MODELOVÁNÍ STANDARDNÍCH PROVOZNÍCH DĚJŮ NA SVORKÁCH.....	72
7.2.2	MODELOVÁNÍ VLIVŮ SVÁRŮ NA PROVOZ SVOREK .....	76
7.3	MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLIVŮ NA SVORKY .....	85
8	ZÁVĚR.....	96
8.1	SHRNUTÍ PRÁCE.....	96
8.2	SPLNĚNÍ DANÝCH CÍLŮ.....	98
	LITERATURA .....	100
	PUBLIKACE DISERTANTA.....	102
	SEZNAM PŘÍLOH .....	103

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

IR	infračervený	(-)
$\lambda$	vlnová délka	(m)
$\lambda_{\max}$	mezní vlnová délka	(m)
$E_{\text{bf}}$	spektrální zářivý výkon černého tělesa	(W/m <sup>2</sup> μm)
$E_{\text{f}}$	spektrální zářivý výkon	(W/m <sup>2</sup> μm)
$E_{\text{b}}$	celková hodnota zářivého výkonu černého tělesa	(W/m <sup>2</sup> )
$E(T)$	celkový zářivý výkon	(W/m <sup>2</sup> )
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	(W/ m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
T	absolutní teplota	(K)
h	Planckova konstanta	(J/s)
c	rychlost světla	(m/s)
k	Boltzmanova konstanta	(J/K)
NIR	blízké infračervené záření	(-)
SWIR	krátké infračervené záření	(-)
MWIR	střední infračervené záření	(-)
LWIR	dlouhé infračervené záření	(-)
FIR	extrémně dlouhé infračervené záření	(-)
FPA	maticové uspořádání detektoru	(-)
DTS	distribuční trafostanice	(-)
vn	vysoké napětí	(-)
nn	nízké napětí	(-)
vv	velmi vysoké napětí	(-)
$\rho$	činitel odrazu	(-)
$\rho_{\lambda'}$	činitel odrazu v závislosti na vlnové délce a směru	(-)
$\tau$	činitel prostupu	(-)
$\alpha$	činitel absorpce	(-)
$\alpha_{\lambda'}$	činitel absorpce odrazu v závislosti na vlnové délce a směru	(-)
$\alpha_A, \alpha_B$	Seebeckův koeficient	(μV/K)
f, ν	frekvence	(Hz)
$f_t$	mezní frekvence	(Hz)
$\nu_p$	frekvence plazmatu	(Hz)
$\Omega, \Omega_i, \Omega_o$	prostorový úhel	(sr)
$\Omega_s$	prostorový úhel	(sr)
$\theta, \theta_i, \theta_o$	polární úhel	(rad)
$\psi$	azimutální úhel	(rad)
$\hat{n}$	normálový vektor	(-)
$\hat{s}, \hat{s}_i, \hat{s}_o$	jednotkový směrový vektor	(-)
I	celková intenzita	(W/sr)
$I_{\lambda}$	spektrální intenzita záření	(W/sr μm)
$I_{b\lambda}$	spektrální intenzita černého tělesa	(W/sr μm)
$I_{bn\lambda}$	spektrální intenzita černého tělesa ve směru normály	(W/sr μm)
i	proud	(A)
$\varepsilon$	emisivita	(-)
$\varepsilon_{\lambda}$	spektrální emisivita	(-)
$\varepsilon_{n\lambda}$	spektrální emisivita v normálovém směru	(-)
$\varepsilon_{\lambda'}$	spektrální emisivita v závislosti na směru	(-)
r	polohový vektor	(-)



$\vec{p}$	vektor pyroelektrického koeficientu materiálu	(-)
$p$	skalární pyroelektrický koeficient	( $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$ )
$Q_\lambda$	tepelný tok vlnové délky na plochu	( $\text{W}/\mu\text{m}$ )
$(q_\lambda)_{in}$	celkový vstupující tepelný tok na jednotkovou vlnovou délku	( $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ )
$(q_\lambda)_{out}$	celkový vystupující tepelný tok na jednotkovou vlnovou délku	( $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ )
$(q_\lambda)_{net}$	čistý tepelný tok na jednotkovou vlnovou délku	( $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ )
$A, A_s, A_j$	plocha	( $\text{m}^2$ )
$A_{jp}, A_p$	průmět plochy	( $\text{m}^2$ )
$\gamma$	faktor tlumeného kmitání	(Hz)
$n, k$	komplexní části indexu lomu	(-)
$m$	index lomu	(-)
$\varepsilon$	komplexní dielektrický činitel	(-)
$\varepsilon', \varepsilon''$	složky komplexního dielektrického činitele	(-)
$\varepsilon_0$	příspěvek k $\varepsilon'$ pro kratší vlnové délky	(-)
$\sigma_{dc}$	odpor v závislosti na frekvenci	( $1/\Omega \text{ cm}$ )
$e$	energie kvanta	(J)
$e_{kin}$	kinetická energie	(J)
$W_z$	šířka zakázaného pásu	(eV)
$C$	tepelná kapacita	(J/K)
$R$	tepelný odpor	(K/W)
$R_s$	citlivost termočlánku	(V/W)
$S_I$	proudová citlivost	(A/W)
$S_\lambda$	spektrální proudová citlivost	(A/W $\mu\text{m}$ )
$S_U$	napěťová citlivost	(V/W)
$S_{U\lambda}$	spektrální napěťová citlivost	(V/W $\mu\text{m}$ )
$I_f$	fotoproud	(A)
$U_f$	fotonapětí	(V)
$U_{out}$	výstupní napětí	(V)
$U_{noise}$		
$I_{f\lambda}$	spektrální fotoproud	(A/ $\mu\text{m}$ )
$U_{f\lambda}$	spektrální fotonapětí	(V/ $\mu\text{m}$ )
$D^*$	detektivita snímače	( $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ )

# 1 ÚVOD

První počátky praktické termodiagnostiky se datují již do minulého století. Již v druhé polovině dvacátého století byly vyvinuty první termokamery, které byly relativně konstrukčně složitější, rapidně větší a hlavně dražší. Postupným vývojem a sériovou výrobou šla cena termokamer dolů a jejich aplikace se rozšířila do více oborů. Dnes se kamery vyrábějí v mnoha provedeních a termovize se přizpůsobuje jednotlivým odvětvím, ve kterých je nasazována.

Použití v energetice je již známé delší dobu, ale masové nasazení v energetice je spojeno až se začátkem dvacátého prvního století. Termovize je dnes běžně nasazována na kontrolu elektrických a elektroenergetických celků.

Tato práce se bude zabývat aplikací této diagnostické metody v distribuční soustavě, má ukázat jaké jsou její výhody a nevýhody. Má upozornit na úskalí této metody a jak metodu aplikovat tak, aby její přesnost byla co největší.

S rozšířením termokamer do běžné praxe je totiž spojeno několik milných představ. Vžila se představa, že pokud máme kameru, uvidíme teplé místo, pak jsme našli problém. Toto však nemusí být pravda. Měření je totiž spojeno se znalostí měřených materiálů a jejich parametrů, se znalostí přístroje jako takového a jeho vhodného nastavení a se správným provedením měření při vhodných podmínkách pro jeho uskutečnění. Bude také ukázáno, jak se mění stěžejní nastavovaný parametr emisivita s oxidací povrchu materiálů a jaké to může vnést do měření chyby. V návaznosti na oxidaci povrchu pak ještě práce upozorní na měření objektů s velmi malou emisivitou. Následně bude zobrazen post-processing a jakým způsobem jsou data po měření zpracována do formy protokolů jako základních výstupů z měření.

Dále se práce bude zabývat zpracováním již naměřených protokolů a ukáže, jak vypadají výsledky z měření v distribučních sítích na rozvodnách, distribučních trafostanicích a vedeních. Jako zdroj informací slouží rozsáhlá databáze protokolů, které byly naměřeny na skutečných zařízeních distribuční sítě. Toto zpracování má vést k nalezení nejproblémovějších částí v jednotlivých distribučních celcích. Výsledky pak budou porovnány v různých oblastních celcích, bude provedeno porovnání v rámci rozdílných provedení stejných funkčních celků. To pak může pomoci pro stanovení spolehlivosti jednotlivých celků a ukáže na přístroje či prvky, které se vykazují jako více závadové a mělo by se na ně více pamatovat v rámci ŘPU.

Závěrem práce pak budou provedeny simulace metodou konečných prvků na dvou druzích pistolových kotevních svorek. Tyto svorky se v rámci dílčích výsledků ukázaly jako nejproblémovější prvek při diagnostice vedení. Dílčí výsledky byly konzultovány s odborníky z praxe a těmi bylo doporučeno se věnovat právě těmto prvkům, aby byla zvýšena spolehlivost provozu nadzemních vedení jako celků. Z jednotlivých simulací by měly vyplynout faktory, které ovlivňují jejich provozní životnost, a které části svorek jsou stěžejní pro jejich správné fungování a jsou těmito faktory nejvíce ovlivňovány. Z výsledků pak bude možné vzájemně porovnat dvě různé svorky mezi sebou a stanovit pozitivní vlastnosti jednotlivých provedení, které pak můžou sloužit jako dobrý zdroj informací při konstrukci nových typů svorek.

Na závěr této kapitoly je nutné zdůraznit cíle disertační práce, které jsou v následujících kapitolách řešeny. Navazují na výše uvedená konstatování a shrnují jednotlivé úkoly do logicky na sebe navazujících bodů.

## Cíle práce:

- Řešení problematiky aplikace termovize v distribučních sítích s poukázáním na

problémy, které byly nalezeny při praktickém měření.

- Zpracování databáze protokolů z měření a určení nejproblémovějších objektů a prvků v jednotlivých energetických celcích.
- Simulační řešení problémů kotevních svorek sloužící k objasnění hlavních faktorů vedoucích k jejich velké poruchovosti.

## 2 FYZIKÁLNÍ TEORIE TEPELNÉHO ZÁŘENÍ

Každý objekt, který má teplotu vyšší než absolutní nula,  $(-273,16\text{ }^{\circ}\text{C})$  vyzařuje záření v infračervené oblasti. Toto záření můžeme popsat pomocí dvou teorií, a to korpuskulární a vlnové. Můžeme se na něj dívat ze dvou pohledů jako záření elektromagnetických vln (vlnová teorie), nebo jako tok fotonů jako základních energetických kvant (korpuskulární teorie).

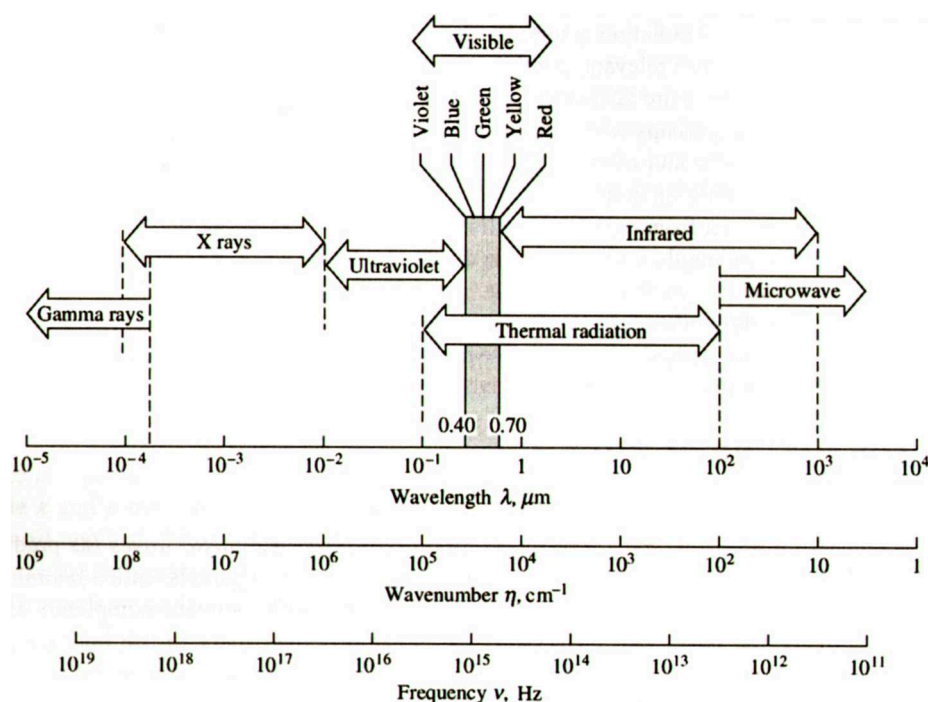
### 2.1 ZÁŘENÍ A VELIČINY PRO JEHO POPIS

Pokud se díváme z pohledu teorie korpuskulární, pak je potřeba si definovat elementární energetické kvantum. Toto kvantum je nazývané foton. Foton si můžeme představit jako základní energetickou dávku, která nese energii závislou na frekvenci. Hodnotu energie pak popisuje následující vztah.

$$e = h \cdot f [J] \quad (1)$$

Energie jednoho fotonu se rovná 1 eV což odpovídá  $1,6022 \times 10^{-19}$  J.

Zabýváme-li se zářením, z pohledu vlnění, pak jeho frekvenční spektrum můžeme vidět na Obr. 1. Tento obrázek popisuje celé spektrum od slyšitelných vln, až po ionizující záření. Můžeme vidět rozdělení dle jednotlivých pojmenovaných subspekter např. mikrovlnné, ultrafialové, záření gama atd.[13]

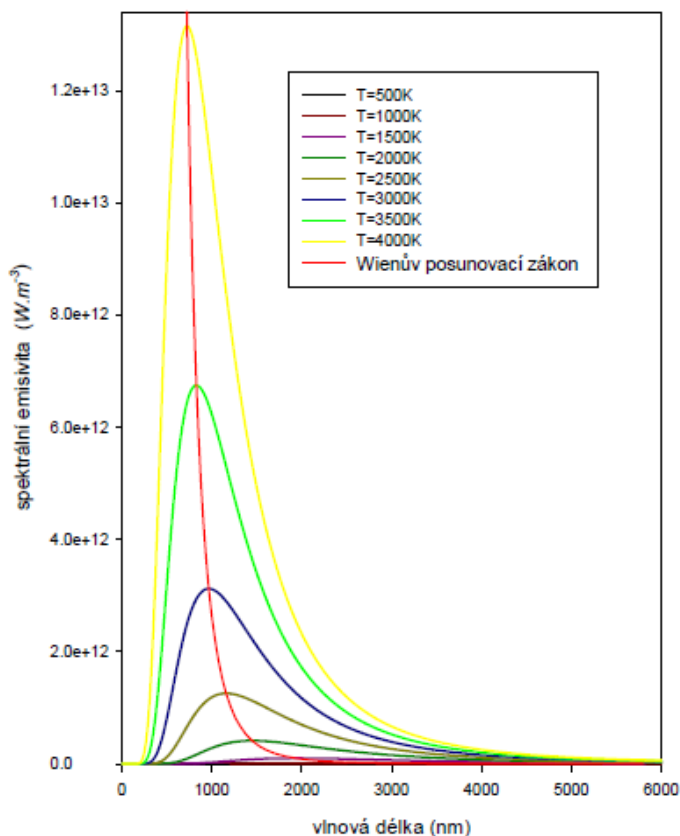


Obr. 1 Frekvenční spektrum

Celkový zářivý výkon při teplotě  $T$  pak můžeme definovat dle následujícího vztahu (2). Zde pak  $E_f$  je spektrální zářivý výkon, který je závislý na vlastnostech obecného tělesa. Těmito vlastnostmi se bude práce zabývat v dalších částech. [13]

$$E(T) = \int_0^{\infty} E_f(T, f) df \quad (2)$$

Pokud jde o spektrální zářivý výkon černého tělesa na jednotlivých vlnových délkách, tím se zabývá Planckův zákon. Grafické znázornění pro jednotlivé teploty můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Vizuální podoba Planckova zákona

Ten ukazuje celkovou zářivou energii pro jednotlivé vlnové délky a teplotu.[1]

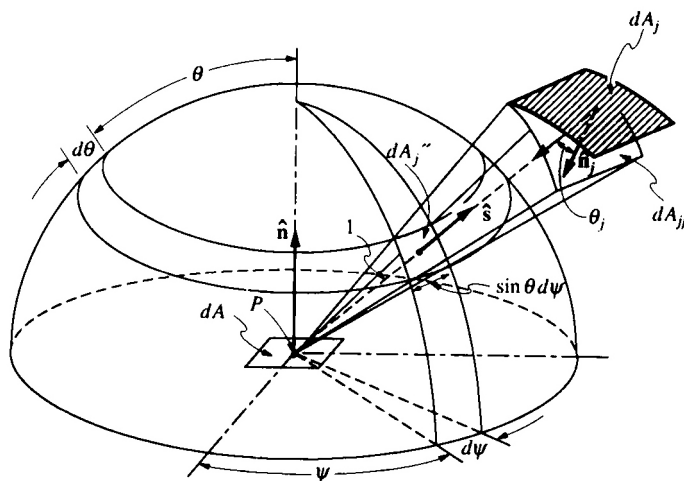
$$E_{bf} = \frac{2\pi^5 h^6 c^2}{15 \lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} 10^{-6} \quad (3)$$

Použitím Planckova zákona s hodnotami vlnových délek  $\lambda = 0$  až  $\lambda = \infty$ , získáváme celkovou hodnotu záření černého tělesa - Stefan-Boltzmanův zákon. Zjednodušeně můžeme popsat, že se jedná o zářivou energii černého tělesa.[1]

$$E_b = \sigma T^4 \quad (4)$$

Pro další definice budeme potřebovat definovat prostorový úhel. Prostorový úhel si můžeme představit jako jednotkovou plochu vymezenou na kulové sféře. Pro představu je tento úhel zobrazen na Obr. 3. Za místo vyzařování je brán element ve středu koule P a jsou zobrazeny jeho normálový vektor  $\hat{n}$  a směrový vektor  $\hat{s}$ . Element září do prostoru kolem sebe, ale my máme vyznačenou elementární plochu  $dA_j$ , která je také popsána svým normálovým

vektorem  $\hat{n}_j$ . Tato plocha je promítnutá do kulové plochy jako  $dA_{jp}$  a úhel od normály plocha  $dA_j$  je  $\theta_j$ .



### Obr. 3 Prostorový úhel

Pro vymezení plochy jsou pak použity dva úhly. První je azimutální  $\psi$  a druhý je polární  $\theta$ . Vzdálenost P a  $dA_j$  je popsána jako S. Pak element prostorového úhlu je definován jako  $d\Omega$  a je zadán následujícím vztahem.

$$d\Omega = \frac{dA_{jp}}{S^2} = \frac{\cos \theta_j dA_j}{S^2} = dA_j'' \quad (5)$$

Pro vyjádření prostorového úhlu můžeme upravit předchozí vztah tak, aby bylo použito polárního a azimutálního úhlu.

$$d\Omega = dA_j'' = (1 \times \sin \theta d\psi)(1 \times d\theta) = \sin \theta d\theta d\psi \quad (6)$$

Celkový úhel, při pohledu z bodu P na element  $A_j$ , pak získáme integrováním vztahu (5). Tento vztah má pak podobu následující.[13]

$$\Omega = \int_{A_{in}} \frac{dA_{jp}}{S^2} = \int_A \frac{\cos \theta_j dA_j}{S^2} = \int_{A_i} dA_j{}'' = A_j{}'' \quad (7)$$

Další veličinou, kterou budeme potřebovat pro popis chování jednotlivých zářičů je intenzita záření. V předešlých částech citovaný zářivý výkon popisuje energii tepelného toku, který vychází z povrchu tělesa, ale už nic neříká o směrových vlastnostech. Proto, abychom mohli popsat i směrové vlastnosti zdrojů záření, pak zavádíme intenzitu záření. Intenzita záření nám pak udává zářivý výkon jdoucí prostorovým úhlem. I v tomto případě mluvíme o spektrální intenzitě a výsledné intenzitě. Vztah mezi nimi je popsán následujícím vztahem (8).

$$I(r, \hat{s}) = \int_0^\infty I_\lambda(r, \hat{s}, \lambda) d\lambda \quad (8)$$

V předchozím vztahu (8) jsou použity  $\mathbf{r}$  jako poziční vektor,  $\hat{\mathbf{s}}$  jako jednotkový směrový

vektor a  $\hat{n}$  jako normálový vektor. Oproti zářivému výkonu je intenzita rozdílná o směrový vektor, který nám popisuje prostorové vymezení zářivého tepelného toku. Pokud bychom vzali celý možný prostorový úhel a integrovali v maximálních mezích, dostali bychom zářivý výkon daného bodu. Základní vztah, který popisuje vzájemnou relaci mezi zářivým výkonem a intenzitou záření je následující (9).

$$E(r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(r, \theta, \psi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi = \int_{2\pi} I(r, \hat{s}) \hat{n} \cdot \hat{s} d\Omega \quad (9)$$

Toto je základní definice, která nemluví o spektrálních vlastnostech intenzity. Vezmeme-li v úvahu tyto vlastnosti, pak můžeme definici jednoduše získat úpravou Kirchhoffova zákona. Uvažujeme-li elementární černou plošku  $dA$  soustředěnou v kulové sféře, kde kulová sféra má ideální odraznou vlastnost, nepohlíží žádné záření a ani žádné neprojde. Na této sféře je pak definován element  $dA_s$ , který vymezuje element prostorového úhlu  $d\Omega_s$ , který je od normály elementu  $dA$  vychýlen o úhel  $\theta$ . Element  $dA$  excituje záření o vlnové délce  $\lambda + d\lambda$ , které je odraženo od  $dA_s$  a pohlceno zpět v  $dA$ . Pak s pomocí definice intenzity a prostorového úhlu vzniká následující vztah (10).

$$I_{b\lambda}(T, \theta, \psi, \lambda)(dA \cos \theta) d\Omega_s d\lambda = I_{b\lambda}(T, \theta, \psi, \lambda)(dA \cos \theta) \left(\frac{dA_s}{R^2}\right) d\lambda \quad (10)$$

Ještě doplníme, že  $d\Omega_s$  je prostorový úhel při pohledu z  $dA$  na  $dA_s$  a energie cykluje z  $dA$  na  $dA_s$  a nazpět, kde  $dA_s$  neemituje žádné záření na vlnové délce  $\lambda$ . Potom můžeme předchozí vztah upravit následovně (11).

$$I_{nb\lambda}(T, \lambda) dA_s d\Omega d\lambda = I_{nb\lambda}(T, \lambda) dA_s \left(\frac{dA \cos \theta}{R^2}\right) d\lambda \quad (11)$$

Kde  $n$  znamená vyzařování ve směru normály a  $d\Omega$  je pohledově obrácený úhel k původnímu  $d\Omega_s$ . Nyní použijeme-li druhý termodynamický zákon, že dva toky v uzavřené izotermální oblasti jsou si rovny, pak dostáváme úpravu, kde posadíme do rovnosti vztah (11) a vztah (10). Pak v libovolném směru  $\theta, \psi$ , kterým je  $dA_s$  orientovaný, můžeme konstatovat, že  $I_{b\lambda}$  je nezávislá na směru a definovat následující vztah (12).

$$I_{b\lambda} = I_{b\lambda}(T, \lambda) \quad (12)$$

Po dosazení do vztahu (9) pak dostáváme vztah mezi intenzitou záření černého tělesa a zářivým výkonem, který lze napsat následovně (13) [13].

$$I_{b\lambda}(r, \lambda) = E_{b\lambda}(r, \lambda) / \pi \quad (13)$$

Po definici intenzity záření je vhodné si ještě definovat tepelný tok. Mějme elementární plochu  $dA$ , která je zobrazená na Obr. 4. Necháme dopadat záření o intenzitě  $I_\lambda(\hat{s}_i)$  pod směrovým vektorem  $\hat{s}_i$ . Ploška má normálový vektor  $\hat{n}$ . Pak z definice intenzity můžeme napsat následující vztah (14).

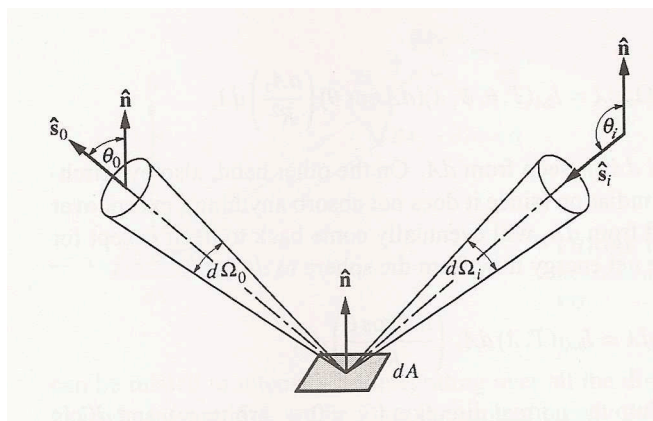
$$dQ_\lambda = I_\lambda(\hat{s}_i) d\Omega_i dA_p = I_\lambda(\hat{s}_i) d\Omega_i (dA \cos \theta_i) \quad (14)$$

Tok vstupující do plochy je negativní, protože  $\cos \theta_i < 0$ . Po integraci přes  $2\pi$  a vydělení

plochou dostáváme celkový tok na jednotkovou vlnovou délku. Ten je definován dle následujícího vztahu (15).

$$(q_\lambda)_{in} = \int_{\cos\theta_i < 0} I_\lambda(\hat{s}_i) \cos\theta_i d\Omega_i \quad (15)$$

Pro plochu opouštějící tepelný tok je vztah obdobný, ale s veličinami  $(q_\lambda)_{out}$ ,  $I_\lambda(\hat{s}_o)$ ,  $d\Omega_o$ . Celkový vztah je pak kladný, protože  $\cos\theta_o > 0$



Obr. 4 Tepelný tok elementární ploch  $dA$

Pro nečerné těleso je spektrální tepelný tok tvořen příspěvky od emise a odrazu. Je použit jeden směrový vektor  $\hat{s}$  pro celkový rozsah prostorového úhlu  $4\pi$  (16).

$$(q_\lambda)_{net} = (q_\lambda)_{in} + (q_\lambda)_{out} = \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{s}) \cos\theta d\Omega_i \quad (16)$$

Dle Obr. 4 můžeme psát, že  $\cos\theta = \hat{n} \cdot \hat{s}$ , protože tepelný tok je brán jen do kladných směrů  $\hat{n}$ . Pak dostaneme následující vztah (17).

$$(q_\lambda)_{net} = q_\lambda \cdot \hat{n} = \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{s}) \hat{n} \cdot \hat{s} d\Omega \quad (17)$$

Pro výsledný světelný tok musíme integrovat přes celé spektrum a celkový vztah pak vypadá následovně (18). [13]

$$q \cdot \hat{n} = \int_0^\infty q \cdot \hat{n} d\lambda = \int_0^\infty \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{s}) \hat{n} \cdot \hat{s} d\Omega \quad (18)$$

## 2.2 OBJEKTY A PROSTŘEDÍ

Pokud uvažuje, že toto záření má určité chování vůči objektům, pak tyto objekty můžeme rozdělit na netransparentní, semitransparentní a transparentní. Objekt transparentní je takový, kterým záření prochází, opakem toho je netransparentní a objekt semitransparentní pak propouští jen určité vlnové délky [13]. Z pohledu světla se může objekt rozdělit ještě trošku jinak, ale světelným spektrem se už nebudeme v této práci zabývat.



Z pohledu objektu, který toto vlnění vyzařuje, je pak ideální objekt nazýván **černé těleso**. Jde o těleso, která absorbuje veškerou dopadající energii, nedochází na něm k odrazu záření a nemá vůči záření selektivní charakter. Toto je však jen ideální případ, skutečné zářiče mají jiné chování. Pokud je jejich chování neselektivní vůči vlnovým délkám, jejich povrch odráží vlnění a nevyzařuje energii jako černé těleso, jedná se o **šedé těleso**. **Skutečná tělesa** jsou ještě selektivní vůči určitým vlnovým délkám.

U skutečných těles pak můžeme definovat činitele odrazu, prostupu a absorpce. Kde činitel odrazu je definován jako (19):

$$\rho \equiv \frac{\text{odražená složka zářáře}}{\text{celkové dopadající zářáře}} \quad (19)$$

Činitel prostupu je definován jako (20):

$$\tau \equiv \frac{\text{složka zářáře průřichotělese}}{\text{celkové dopadající zářáře}} \quad (20)$$

Činitel absorpce je definován takto:

$$\alpha \equiv \frac{\text{absorbovaná složka zářáře}}{\text{celkové dopadající zářáře}} \quad (21)$$

U skutečných objektů pak můžeme uvažovat, že jednotlivé činitele jsou závislé na vlnové délce záření, pak do jejich definic musíme zařadit proměnou  $\lambda$ . Pokud se jedná o běžné těleso pak platí následující vztah.

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (22)$$

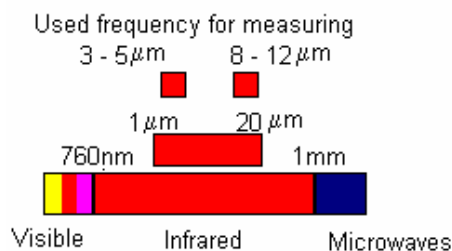
U tělesa, které je netransparentní je činitel prostupu roven nule, a proto se vztah upraví následovně.

$$\rho + \alpha = 1 \quad (23)$$

Z pohledu Kirchhofova zákona můžeme tvrdit, že pro většinu těles se dá tvrdit, že  $\epsilon_\lambda$  je rovna  $\alpha_\lambda$  a  $1 - \rho_\lambda$

## 2.3 CELKOVÉ ROZDĚLENÍ IR SPEKTRA

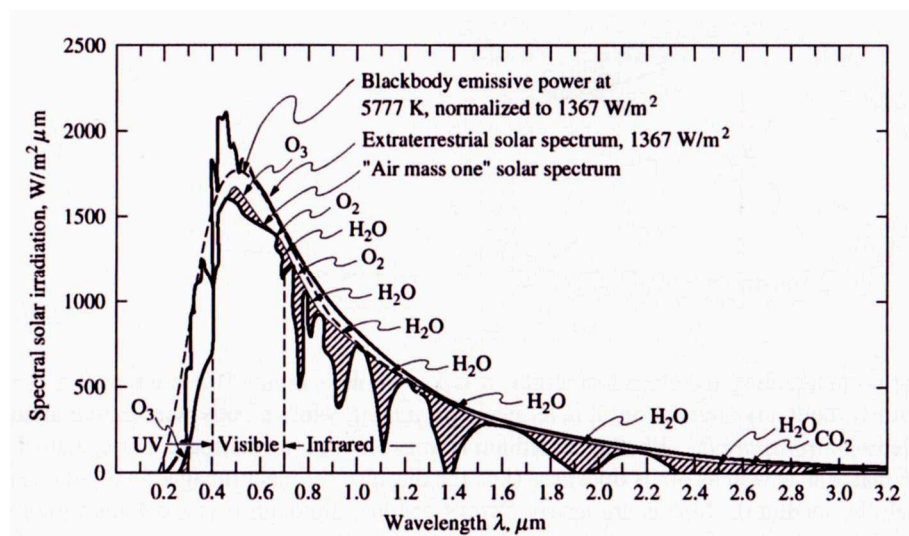
Infračervené záření je definováno jako spektrum záření, které se nachází **pod** viditelným zářením. Pro tepelnou diagnostiku se vymezuje oblast **nad** viditelným zářením v rozmezí vlnových délek 1-20  $\mu\text{m}$  viz Obr. 5.



Obr. 5 Používané frekvence pro termální zobrazování

- Blízké infračervené záření – NIR - vlnová délka 0,76–1,4  $\mu\text{m}$ , definováno podle vodní absorpce; často používané v telekomunikacích (optická vlákna)
- Krátké IR – SWIR - vlnová délka 1,4–3  $\mu\text{m}$ , při 1450 nm značně roste vodní absorpce
- Střední IR – MWIR - též prostřední (intermediate-IR neboli IIR), vlnová délka 3–8  $\mu\text{m}$
- Dlouhé IR – LWIR - vlnová délka 8–15  $\mu\text{m}$
- Extrémně dlouhé IR - FIR – vlnová délka 15–1000  $\mu\text{m}$  [1]

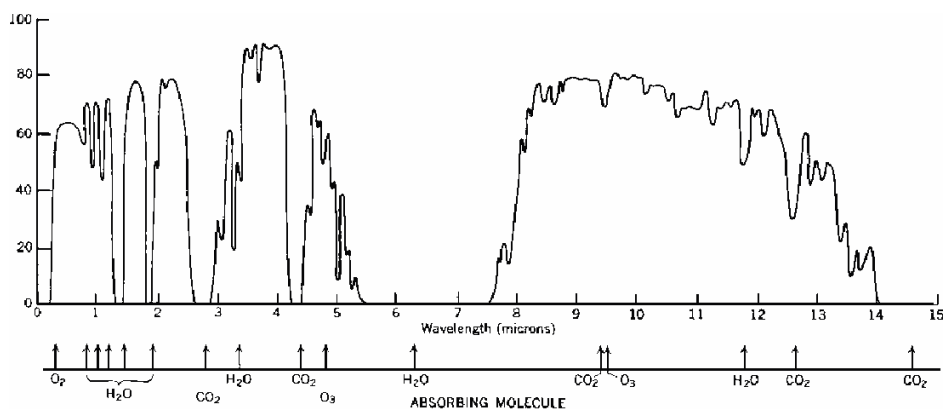
Pro příklad si můžeme zobrazit blízké a krátké infračervené záření, které dopadá na zemi. Graf hodnot sluneční radiace v infračervené oblasti dopadající na zemi, můžete vidět na Obr. 6.



Obr. 6 Sluneční záření dopadající na zemi

Na předešlém obrázku je také vidět, jak se na záření projeví propustnost atmosféry, kde jednotlivé popisky ukazují, které plyny se nejvíce projevují na útlumu atmosféry. Jako majoritní se ukazuje vodní pára a kyslík.[13]

Důležitý vliv na průchod IR záření od zdroje k měřicí aparatuře má spektrální propustnost atmosféry. Na Obr. 7 můžeme vidět, jak vypadá celková křivka propustnosti pro vlnové délky od 0 do 15  $\mu\text{m}$  [8]. Pod osou x jsou zobrazeny absorbující částice. S uvažováním absorpčních vlivů se pak pro měření v běžných teplotách používají vlnové délky 3 – 5  $\mu\text{m}$  pro vyšší teploty a 8-12  $\mu\text{m}$  pro nižší teploty.



Obr. 7 Křivka absorpce záření v atmosféře

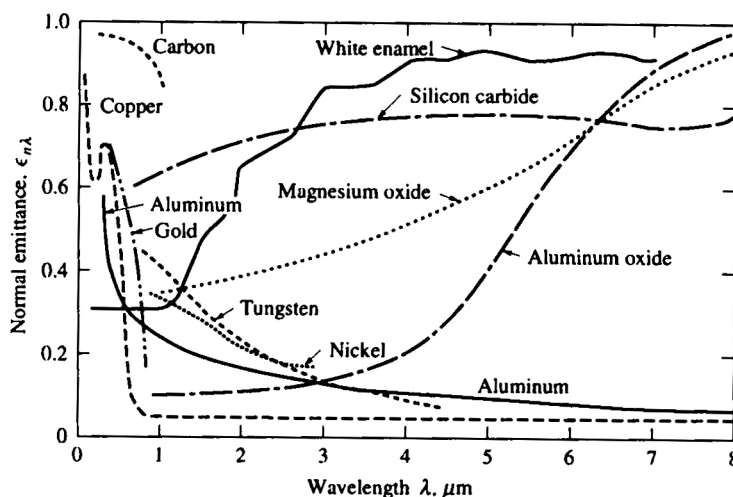
Pokud jde o záření, pak v předchozích podkapitolách jsme si popsali jeho spektrum. Ukázali jsme si, jak záření prochází skutečným prostředím a definovali jednotlivé druhy těles, které se v tomto prostředí vyskytují. Uvedené zákony jsou definovány obecně, nebo pro černá tělesa, toto však pro popis skutečných těles moc dobře neposlouží. Chování skutečného tělesa pak pomáhá popsat emisivita.

## 2.4 EMISIVITA

Emisivitu berme jako funkci, která popisuje schopnost tělesa vyzařovat energii. Tato funkce je definována dle následujícího vztahu.

$$\varepsilon = \frac{\text{energie emitovaná z povrchu tělesa}}{\text{energie emitovaná z povrchu černého tělesa při stejné teplotě}} \quad (24)$$

Emisivita může nabývat hodnot od 0 do 1, kde hodnota jedna odpovídá hodnotě pro černé těleso. Její hodnota bývá závislá na teplotě, vlnové délce a úhlu vyzařování. Ukázka hodnot emisivity ve směru normály je uvedena na Obr. 8.[14]



Obr. 8 Změna emisivity v závislosti na vlnové délce

Jak si popíšeme dále, pro praktické měření se používá tato funkce jako parametr a je konstantní. Z fyzikální podstaty je závislá na prostorových a materiálových vlastnostech popisovaného objektu. Emisivita hodně závisí na úpravě povrchu materiálu a jeho opotřebení. Jako opotřebení bereme mechanické poškození, nebo v případě pevného nekontaktního uložení prvků, jde o atmosférické vlivy ovzduší. Tyto atmosférické vlivy pak způsobují vznik oxidů, usazování látek atd. Této problematice se budeme věnovat v dalších kapitolách.

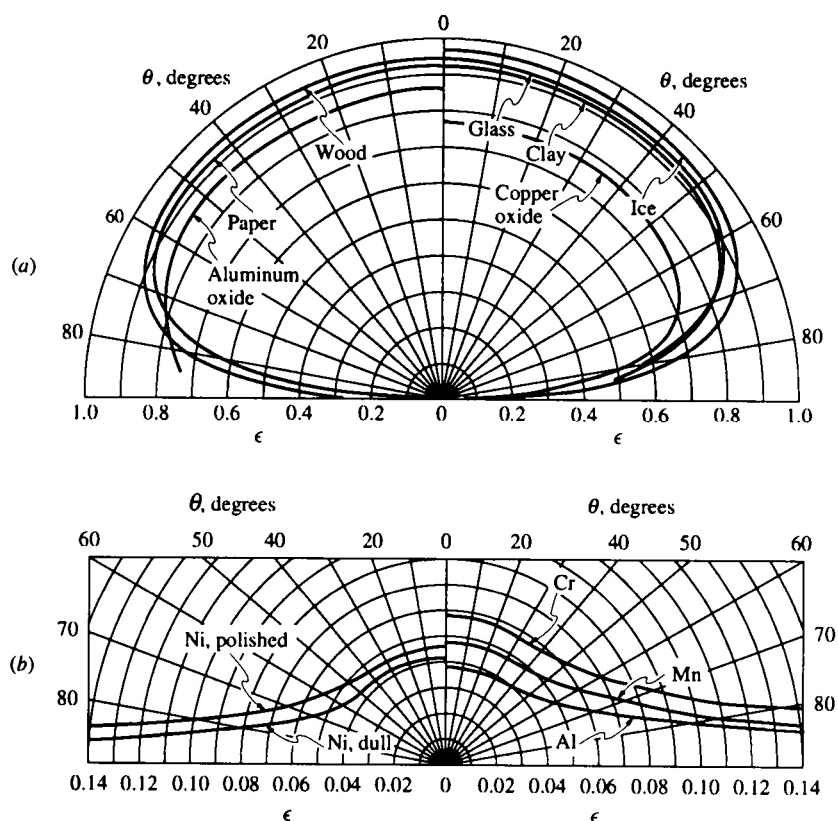
Pokud se vrátíme k základní definici emisivity, může říct, že při zanedbání povrchových vlastností, se bude definovat dle následujícího vztahu (25). Tento vztah popisuje její spektrální vlastnosti, její tepelnou závislost a její směrovost.

$$\varepsilon_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0) = \frac{I_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0) \cos \theta_0 d\Omega_0}{I_{b\lambda}(T, \lambda) \cos \theta_0 d\Omega_0} = \frac{I_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_0)}{I_{b\lambda}(T, \lambda)} \quad (25)$$

Většina z předchozího vztahu již byla definována v předešlých kapitolách. Tento vztah nám popisuje emisivitu ve fyzikální podstatě. Pokud se jedná o zářič, který vyzařuje do všech směrů stejně, označujeme jej jako difusní zářič. Můžeme také definovat emisivitu do hemisféry v závislosti na vlnové délce a teplotě. Zde pak vyjdeme z definice zářivého výkonu, jelikož nemusíme řešit záření ve směru od povrchu. Vztah potom vypadá následovně (26).[13]

$$\varepsilon_{\lambda}(T, \lambda) = \frac{E_{\lambda}(T, \lambda)}{E_{b\lambda}(T, \lambda)} \quad (26)$$

Pro příklad uvedeme ještě obrázek, který popisuje závislost emisivity na směru vyzařování u kovových a nekovových materiálů. Na tomto obrázku je jasně vidět, že lesklé plochy neoxidovaných materiálů vyzařují velice málo. Protikladem jsou pak oxidy jednotlivých materiálů, které mají emisivitu poměrně vysokou a to až desetkrát. Příklady můžete vidět na Obr. 9.[15]



Obr. 9 Emisivita v závislosti na směru (a) nekovové materiály (b) kovové materiály

Emisivita materiálu se velmi často ověřuje měřením, existuje více zdrojů, kde se dá najít hodnota pro daný materiál. Existuje také možnost jak emisivitu odhadnout výpočtem. Mluvíme o odhadu, protože reálné hodnoty jsou závislé na působení prostředí. **Základ výpočtu pro vodiče** vychází z Fresnelova vztahu. Komplexní index lomu z tohoto vztahu je uveden v následujícím řádku.

$$m = n - ik \quad (27)$$

Dále je vztah zobecněn pomocí Snellova zákona a obecných předpokladů pro vodiče. Pro normálové působení pak můžeme psát (28).

$$\rho_{n\lambda} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (28)$$

Komplexní index lomu se musí změřit nebo předpovědět pomocí disperzní teorie. Z disperzní teorie pak můžeme definovat komplexní dielektrickou funkci  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ . Platí pak následující vztah  $\varepsilon = m^2$ , který můžeme rozepsat na následující rovnice (29).[13]

$$n^2 = \frac{1}{2}(\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}) \quad (29)$$

$$k^2 = \frac{1}{2}(-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}) \quad (30)$$

Vztahy pro výpočet komplexní dielektrické funkce vychází například z Drudeho elementární teorie vodivosti, která vychází z Lorenzova modelu. Pak koeficienty pro danou frekvenci můžeme spočítat dle následujících dvou rovnic (31,32).[16]

$$\varepsilon'(v) = \varepsilon_0 - \frac{v_p^2}{v^2 - \gamma^2} \quad (31)$$

$$\varepsilon''(v) = \frac{v_p^2 \gamma}{v(v^2 + \gamma^2)} \quad (32)$$

Dále pak můžeme použít Hagen-Rubensův vztah a dojít rovnou k hodnotám  $n$  a  $k$ . Vztah pak vypadá dle následujícího.[17]

$$n \cong k \cong \sqrt{30\lambda_0\sigma_{dc}} \quad (33)$$

Hodnotu spektrální emisivity v normálovém směru  $\varepsilon_{n\lambda} = 1 - \rho_{n\lambda}$  pak můžeme dopočítat z jednotlivých předchozích vztahů. Je nutné však znát  $\gamma, \sigma_{dc}, v_p$ . Ty můžeme najít v různých zdrojích např. [18]. Pak vhodnost použití předchozích dvou teorií byla ověřena experimentem a pro Drudeho teorii je doporučeno počítat s většími vlnovými délkami než  $1 \mu\text{m}$  a pro Hagen-Rubensův vztah s délkou větší jak  $6 \mu\text{m}$ , abychom se dostali do dostatečné přesnosti výsledků. Toto byla normálová emisivita u kovů a pokud jde o směrovou spektrální vodivost, ta vychází z následujícího vztahu.

$$\varepsilon_{\lambda}' = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{(n \cos \theta - 1)^2 + (k \cos \theta)^2}{(n \cos \theta + 1)^2 + (k \cos \theta)^2} + \frac{(n - \cos \theta)^2 + k^2}{(n + \cos \theta)^2 + k^2} \right) \quad (34)$$

Kde  $\theta$  je polární úhel od normály.[13]

**Pro nevodiče** pak můžeme předpokládat, že se jedná o perfektní dielektrika a pro složky komplexního lomového činitele to znamená, že  $k^2 \ll (n-1)^2$ . Potom můžeme psát následující vztah pro spektrální normálovou intenzitu (35).

$$\varepsilon_{n\lambda} = 1 - \left( \frac{n-1}{n+2} \right)^2 \quad (35)$$

Pak po dosazení do Fresnelových vztahů dostáváme vztah pro spektrální emisivitu ve směru (36).

$$\varepsilon_{\lambda}' = 1 - \frac{1}{2} \left( \left( \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 + \left( \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \right) \quad (36)$$

Někdy pak ještě můžeme pomocí poměrů směrové a normálové emisivity definovat směrový poměr, ten je dán podílem normálové a směrové emisivity. Ten nám pak vypovídá o směrových vlastnostech zářiče.[13]

## 2.5 DETEKTORY

Detektor bereme jako základní prvek pro kvantitativní měření veličin. V našem případě, kdy se práce zabývá termozobrazovací a měřením emitujícího záření z objektu, se nejvíce budeme zajímat o bezkontaktní měření teploty. Pokud se jedná o měření infračerveného záření, pak možností volby snímače je několik, jak můžeme vidět v následující části.

Detektory fungují na principu fotoelektrického jevu, který popsal ve své práci v roce 1905 Albert Einstein. Upravil **Plackův** stav pro kvantování energie o absorpci na následující podobu (37).

$$e = h \cdot f = e_{kin} + A_v \quad (37)$$

První část vztahu byla popsána v kapitole 2.1. V další části předchozího vztahu pak  $e_{kin}$  je kinetická energie uvolněného elektronu a  $A_v$  energie potřebná pro uvolnění elektronu z povrchu tělesa. Vztah se pak dá popsat tak, že absorbovaná energie se využije pro vypuzení elektronů a zbylá se jim dodá jako kinetická energie. Pokud je absorbovaná energie větší než vazební energie  $A_v$ , pak se jedná o **vnější fotoelektrický jev**. Pokud je energie menší, pak mluvíme o **vnitřním fotoelektrickém jevu**.

Tab. 1 Typy fotodetektorů

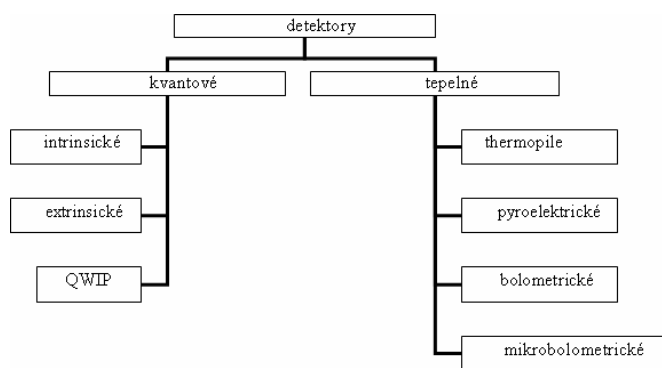
Fotoelektrický jev			
<u>Vnější</u>	<u>Vnitřní</u>		
	<b>Tepelné</b>	<b>Kvantové</b>	
	Neselektivní	Selektivní	
Vakuové prvky	Bolometr, pyrodetektor, infratermočlánek	homogenní	nehomogenní
Fotočlánek, fotonásobič		Fotoodpor	Fotodioda

V dalších částech se budeme spíše věnovat senzorům s vnitřním fotoelektrickým jevem, které jsou používány častěji. Tyto detektory pak dle předchozí tabulky dělíme na tepelné a kvantové. U tepelných detektorů nemusí být energie dopadajícího záření větší než šíře zakázaného pásu. Změna teploty detektoru pak vyvolá změnu např. odporu. Kvantové detektory pak absorbují záření jehož energie musí být vyšší než energie zakázaného pásu.

Absorbované záření pak mění hodnotu elektrického proudu. Z principu funkce pak vyplývá selektivita jednotlivých typů detektorů. U kvantových detektorů jde pak o homogenní provedení, kdy prvek neobsahuje PN přechod a nehomogenní provedení, kdy detektor obsahuje PN přechod.[19]

Spektrální vlastnosti infračerveného záření, které bylo popsáno v kapitole 2.3, pak určují parametry pro detektory. Jednotlivé typy se od sebe liší principem funkce, použitými materiály, citlivostí, selektivitou a časovou konstantou. Na

Obr. 10 je ukázáno několik typů senzorů pro bezkontaktní měření teploty. Kde intrinsické detektory dle Tab. 1 odpovídají homogenním a extrinsické odpovídají nehomogenním. Toto označení vypovídá o obohacení materiálu detektoru o donory nebo akceptory pro vznik PN přechodu.[11]



Obr. 10 Rozdělení detektorů

### Parametry reálného fotodetektoru

Zatím zde bylo uvedeno něco o detektorech jen na obecné rovině. V této a dalších částech se pak budeme věnovat vybraným určitým detektorům a jejich reálným parametrům. Pro popis jednotlivých detektorů se uvádí jejich funkční parametry. Ne všechny tyto parametry se dají použít pro definici detektorů.

#### Parametry:

$n$	neidelalita PN přechodu
$U_0$	výstupní napětí naprázdno
$I_k$	výstupní proud nakrátko
$I_0$	závěrný (v nepropustném směru, saturační, za tmy) proud
$R_{char}$	charakteristický odpor
$R_0$	odpor za tmy
$U_m, I_m$	napětí a proud maximálního výkonu
FF	činitel zaplnění
	citlivost (statická, diferenciální, spektrální), proudová, napěťová
	kvantová účinnost (výtěžnost)
	pohltivost

#### *Parazitní parametry*

$R_s$	sériový odpor
$R_p$	paralelní odpor

#### *Parametry dynamického režimu*

	kapacita přechodu
	časová konstanta elektrická

## časová konstanta tepelná

Pokud jde o praktické hodnoty, nejsou zde definovány všechny, ale jen důležitější. Začneme například **mezní hodnotou vlnové délky**, ta je definována dle následujícího vztahu (38).

$$\lambda_{\max} = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{W_z} = \frac{6,26 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{1}{W_z} = 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta W_z^{-1} \quad (38)$$

Pro tento vztah, který je platný pro kvantové snímače, ještě uvedeme několik hodnot šířky zakázaného pásu pro nejpoužívanější druhy materiálů pro výrobu detektorů. Hodnoty jsou uvedeny pro  $T = 300 \text{ K}$  a můžeme je vidět v Tab. 2.

Tab. 2 Příklady šířky zakázaného pásu

Materiál	$\Delta W_z$	Materiál	$\Delta W_z$
Si	1,12 eV	PbS	0,39 eV
Ge	0,65 eV	CdS	2,4 eV
GaAsP	1,8 eV	GaSb	0,7 eV
Se	1,74 eV	InSb	0,18 eV
Te	0,35 eV		

Z tepelných detektorů je pak termodiagnostice nejbližší bolometr. Pro bolometry se mezní kmitočet určuje z následujícího vztahu (39).

$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi CR} \quad (39)$$

Kde  $R$  je celkový tepelný odpor detektoru a  $C$  je tepelná kapacita detektoru.

Další parametr je jeden z nejdůležitějších. Jedná se o **citlivost detektoru**. Tu můžeme rozdělit na proudovou a napěťovou citlivost. Dále ji můžeme dělit na celkovou a spektrální. Někdy se udává i relativní citlivost, zde jde o poměr k maximální citlivosti při určené vlnové délce.

Proudová citlivost je dána následujícími vztahy, kde první je absolutní (40), ta je při integraci přes celé zářivé spektrum, a následuje spektrální (41).

$$S_I = \frac{I_f}{E(T)} \quad (40)$$

$$S_{I\lambda} = \frac{dI_f \lambda}{E_f} \quad (41)$$

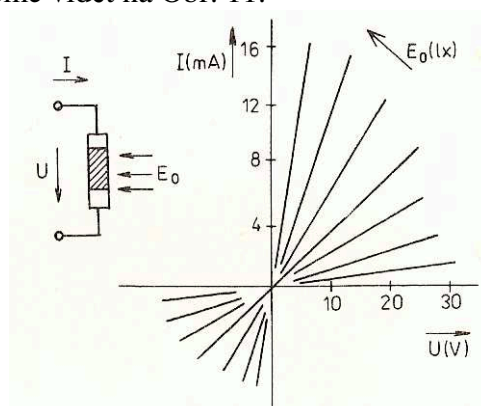
Napěťová citlivost je podobná proudové a je definována dle vztahu (40) pro celkovou jako  $S_u$ , kde měníme  $I_f$  za  $U_f$  a spektrální  $S_{u\lambda}$  dle vztahu (41), kde měníme  $dI_f \lambda$  za  $dU_f \lambda$ . [19]

Pokud jde o další reálné funkční parametry, tak tyto už vyplývají z náhradního schéma pro detektor a jsou vztaženy pro jednotlivé typy. V následujících částech si uvedeme nějaké příklady pro kvantové a tepelné detektory. Více se pak budeme věnovat tepelným detektorům a obzvláště pak mikrobolometrům, protože tyto snímače obsahuje majoritní část termokamer.



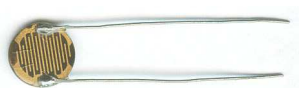
### 2.5.1 KVANTOVÉ DETEKTORY

Zaprvé se budeme věnovat kvantovým intrinsickým detektorům, kde nejznámějším zástupcem je **fotorezistor**. Tento prvek funguje na principu vnitřního fotoelektrického jevu, kdy absorbované záření pomáhá uvolnit elektrony z vazeb. Závislost je taková, že s rostoucím dopadajícím zářením se zvedá jeho vodivost, protože se zvyšuje počet vodičů náboje. Charakteristiku prvku můžeme vidět na Obr. 11.



Obr. 11 Charakteristika fotorezistoru

Detektory jsou vyráběny z polovodivého materiálu. Nejčastěji se pro výrobu používají materiály jako CdS, Si, CdSe, InAr, InSb, PbTe. Dle materiálu je pak určena maximální citlivost detektoru. Pro infračervené pásmo jsou nejvhodnější poslední tři z předešlých šesti jmenovaných.



Obr. 12 Fotorezistor

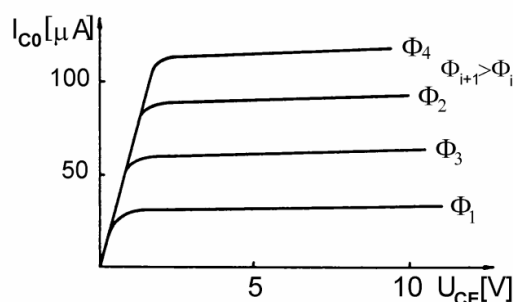
Závislost odporu na intenzitě záření je exponenciální. Příklad reálného fotoodporu můžete vidět na Obr. 12. Maximální citlivost pro jednotlivé materiály je pak vidět v Tab. 3. [20]

Tab. 3 Maximální citlivosti pro jednotlivé prvky a sloučeniny

Materiál	Max. citlivost	Materiál	Max. citlivost
ZnS	340nm	Ge	1580 nm
CdS	520 nm	PbS	3350 nm
CdSe	690 nm	InAr	3540 nm
CdTe	830nm	PbTe	4130 nm
Si	1100 nm	InSb	6900 nm

Pokud jde o skutečné parametry, pak nejlépe je hledat na stránkách výrobců nebo prodejců. Zde jsou uvedeny základní hodnoty reálného prvku fotoodporu, který je podobný prvku na předchozím obrázku. Příklad údajů, které výrobce u těchto snímačů udává: 10kOhm./1MOhm., 125mW, 150VDC, 565÷605nm, -30°C÷+75°C, prům.7.3x1.8mm. Pro další hodnoty jsou už pak potřeba pročítat katalogové listy výrobce.

**Fotodiody, fototranzistor** jsou prvky, které patří do skupiny kvantových extrinsických detektorů. Jejich hlavním rozdílem je oproti předchozím, že obsahují jeden a více PN přechodů. Základní bipolární provedení fotodiody vypadá jako LED dioda, ale slouží ke snímání, nikoliv k emisi, záření. Tyto detektory se vyrábí pro viditelné a IR spektrum. Tmavá provedení jsou pro infračervenou oblast. Fototranzistor je používán pro větší citlivost, ale má horší parazitní parametry a v bipolárním provedení je použitelný maximálně do 50 kHz. Pro fotodiody je mezní kmitočet 100 kHz. Pro rychlejší frekvence se pak používá PIN a lavinových diod. Dotaci přechodu provádí dopadající záření dodáním energie pro nosiče náboje, které se pak účastní kolektorového proudu. Velikost tohoto proudu je pak dána proudovým zesilovacím činitelem. Proud emitor kolektor je tedy řízen dopadajícím zářením viz Obr. 13. Na tomto obrázku je tranzistor ve zdrojovém zapojení.



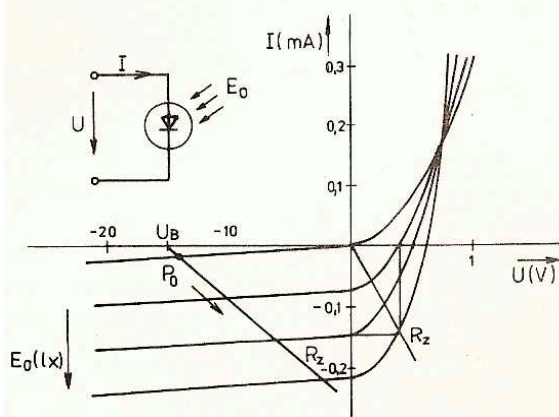
Obr. 13 Charakteristiky fototranzistoru pro různé hodnoty záření

Pokud jde o praktické provedení fototranzistoru, tak toto je možné vidět na následujícím obrázku.



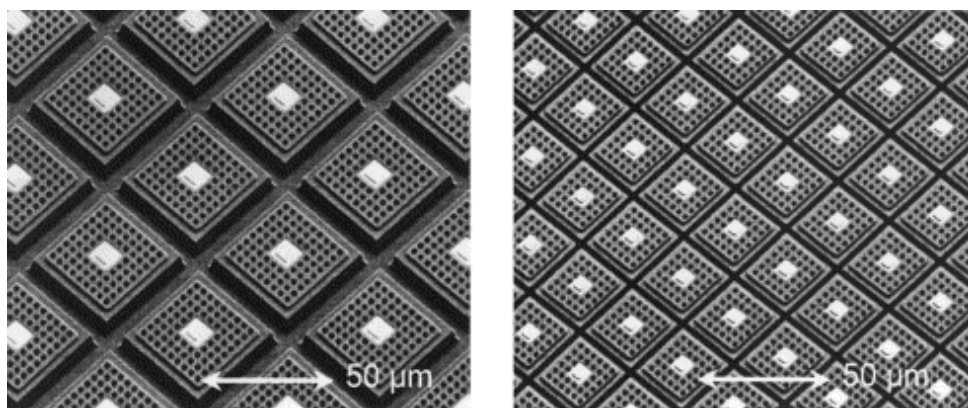
Obr. 14 Fototranzistor

Pro obraznost je zde přidána ještě následující charakteristika fotodiody, kde jsou zobrazeny všechny čtyři kvadranty. Je tam možné porovnat chování diody v propustném i závěrném směru Obr. 15. [21]



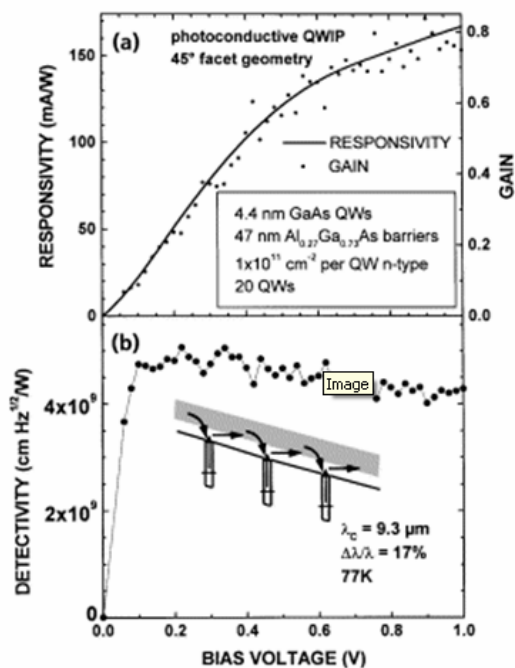
Obr. 15 Charakteristika fotodiody

**QWIP** (quantum well infrared photodetectors) jsou detektory založené na vícevrstvé polovodivé struktuře. Struktura se skládá z velice tenkých vrstev, které jsou citlivé na záření určité vlnové délky, prakticky se tloušťky pohybují v jednotkách až desítkách nm. Pokud záření dodá energii určité vrstvě, ta pak vyprodukuje elektron. Jednotlivé vrstvy pak produkují proudy odpovídající záření a ten zpracovává obvod, který se stará o vyčítání informací. Uspořádání detektoru pro dvě rozlišení a vlnové délky je vidět na Obr. 16. Nejčastěji používané polovodivé materiály pro výrobu senzorů jsou AlGaAs, InGaAs a GaS.



Obr. 16 Qwip struktura pro dvě rozlišení zobrazená na elektronovém mikroskopu

Kvantové jámy jsou vidět na obou částech obrázků, vlevo je snímač s rozlišením 256 x 256 pixelů a vpravo je focen snímač s rozlišením 640 x 512 pixelů. Praktické hodnoty citlivosti a zesílení jsou uvedeny v horní části následujícího obrázku Obr. 17. Dole je pak uvedena detectivita vztažená na relativní napětí při teplotě 77 K a vlnové délce 9,3 μm. Tepelné rozlišení senzorů se pak pohybuje v rozmezí 10 – 30 mK.

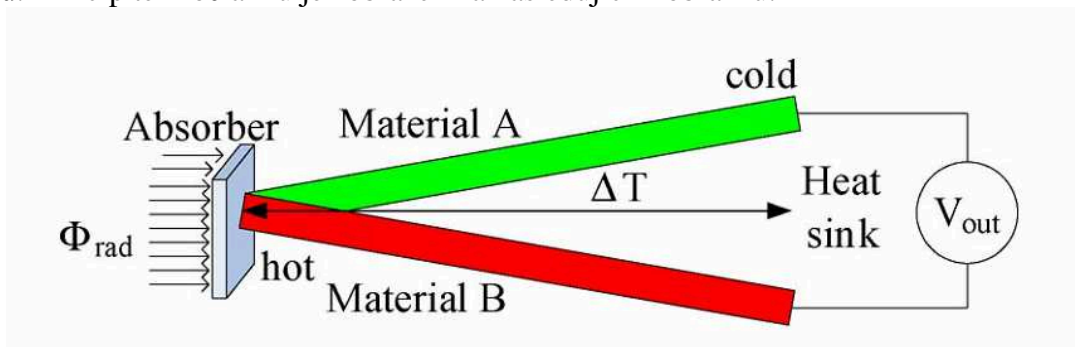


Obr. 17 Praktické hodnoty pro reálné provedení snímače

## 2.5.2 TEPELNÉ DETEKTORY

Tepelné detektory jsou dalším používaným typem detektorů, které oproti kvantovým využívají přímou změnu teploty materiálu. Změna teploty způsobí změnu jiné fyzikální vlastnosti, která je pak snímána elektrickým obvodem. Oproti kvantovým jsou méně selektivní, ale mívají delší časovou konstantu. Většinu snímačů není nutné chladit. Mezi nepoužívanější pak patří následující senzory.

**Termočlánky, thermopile** detektory. Jedná se o klasické termočlánky a termočlánkové baterie, které využívají rozdíl výstupní práce elektronů u různých materiálů. Jde o termoelektrický jev, který se projevuje vznikem napětí na spojení dvou různých materiálů. Princip termočlánku je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 18 Princip termočlánku

Velikost výstupního napětí je dána dle následujícího vztahu (42), a pro jeho vyčíslení je potřeba znát Seebeckovi koeficienty pro jednotlivé materiály. Pokud jde o materiálové provedení a hodnoty tohoto koeficientu, pak kovy mají hodnotu v řádech ( $10^{-6} - 10^{-5}$ ) a u polovodičů je hodnota ( $10^{-5} - 10^{-3}$ ).

$$U_{out} = (\alpha_A - \alpha_B) \Delta T \quad (42)$$

Pak termočlánkové baterie jsou sériově pospojované termoelektrické články. Jejich výstupní napětí je pak dáno následujícím vztahem (43).

$$U_{out} = N(\alpha_A - \alpha_B) \Delta T = (\alpha_A - \alpha_B) \sum \Delta T \quad (43)$$

Kde  $N$  je počet termočlánků a suma  $\Delta T$  je pak součet rozdílu teplot pro jednotlivé termočlánky. Pak ještě můžeme vyjádřit citlivost termočlánku nebo baterie a to následujícím vztahem (44).

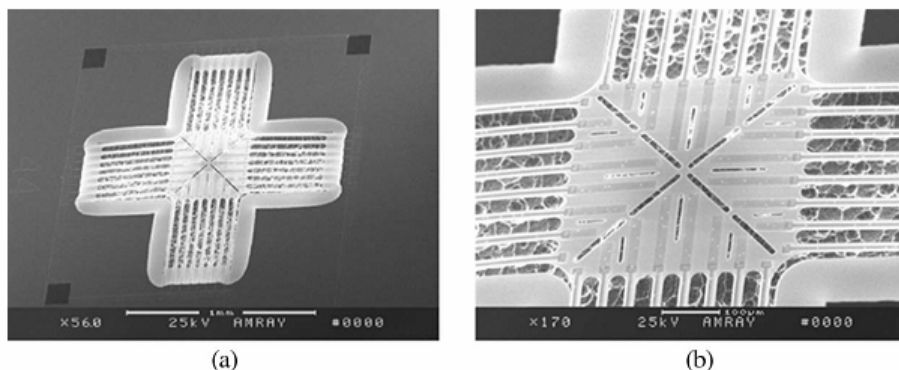
$$R_s = \frac{U_{out}}{E(T)A_s} \quad (44)$$

Kde  $R_s$  je citlivost,  $E(T)$  je dopadající zářivý výkon a  $A_s$  je plocha termočlánku.

$$D^* = \frac{R_s \sqrt{A_s}}{U_{noise}} \quad (45)$$

Praktické provedení termočlánkové baterie je vidět na Obr. 19. Jedná se o termočlánek vytvořený CMOS technologií v mikrostruktuře čipu. Na obrázku můžeme vidět jednotlivé termočlánky a pak detail záběru na střed struktury, kde místa směřující ke středu struktury jsou absorpční a místa na okraji jsou studené části termočlánku. Tento prvek má pak

citlivostní oblast od 150  $\mu\text{m}$  do 1 mm vlnové délky dopadajícího záření.[23]



Obr. 19 Mikrotermočláňková baterie pod elektronovým mikroskopem

**Pyroelektrické snímače** jsou dalším velice používaným druhem snímače. Tento snímač funguje na principu pyroelektrického jevu, kdy za působení tepelného záření, které ohřívá pyroelektrický materiál dochází ke změně jeho polarizace. Toto vyvolá změnu elektrického náboje a následný proud. Tento snímač pracuje za běžných pokojových teplot. Jeho spektrum citlivosti je poměrně široké, a proto se tyto snímače opatřují filtry pro výběr určitého subspektra. Hlavním měřítkem vhodnosti materiálu je jeho vektor pyroelektrického koeficientu  $\vec{p}$ . Pak  $\vec{Q}$  je vektor polarizace. Popsat vzájemný vztah můžeme následovně (46).

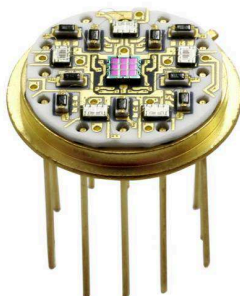
$$\vec{Q} = \Delta T \cdot \vec{p} \quad (46)$$

Materiál pro detektor je pak uzavřen mezi dvě rovnoběžné vodivé desky a při polarizaci se vektor materiálu stává normálou desek a je označen skalárem  $p$ . Proud snímače je pak vyjádřen následujícím vztahem (47).

$$i = p \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dt} \quad (47)$$

Kde  $A_s$  je plocha vodivé desky. Pro tyto snímače jsou například používané materiály PZT, TGS,  $\text{LiTaO}_3$ , které mají pyroelektrický koeficient v hodnotách 10 – 400.[24]

Praktické provedení celého pyroelektrického snímače je zobrazeno na následujícím obrázku. Obrázek ukazuje celé pouzdro snímače i se signál zpracujícími obvody. V pouzdře je umístěn maticový detektor s 3 x 3 elementy. Citlivost tohoto snímače je 8000 V/W v 10Hz. Detektivita je větší než  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ . [25]

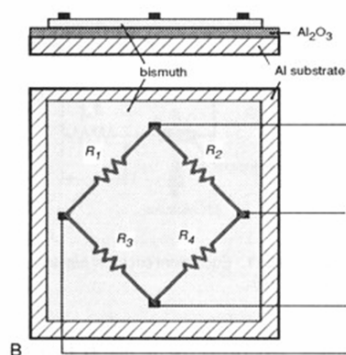


Obr. 20 Pyroelektrický senzor



**Bolometry a mikrobolometry** jsou poslední dobou jedny z nejpoužívanějších tepelných detektorů. Mikrobolometry tvoří základ velké většiny termokamer. Základ bolometru tvoří struktura, která absorbuje tepelnou energii. Tato energie ohřívá materiálovou strukturu. S teplotou těla struktury se pak mění parametry. Velikost změny teploty je pak dána termodynamickými pochody v krystalu. Ohřátí materiálu závisí na tepelné kapacitě a tepelné vodivosti nejen jeho těla, ale i okolních prvků, které poskytují spojení s vyhodnocovacím obvodem, tepelnou stabilitu a další funkce, které jsou potřeba pro nejpřesnější vyhodnocení změny teploty. Změny teploty krystalu bývají velice malé, praktický dosahují hodnot 10 – 50 mK. Změna teploty pak může být měřena speciálními termistory. Celá soustava musí být pak tepelně odstíněná od rušivých a nežádoucích vlivů.[26]

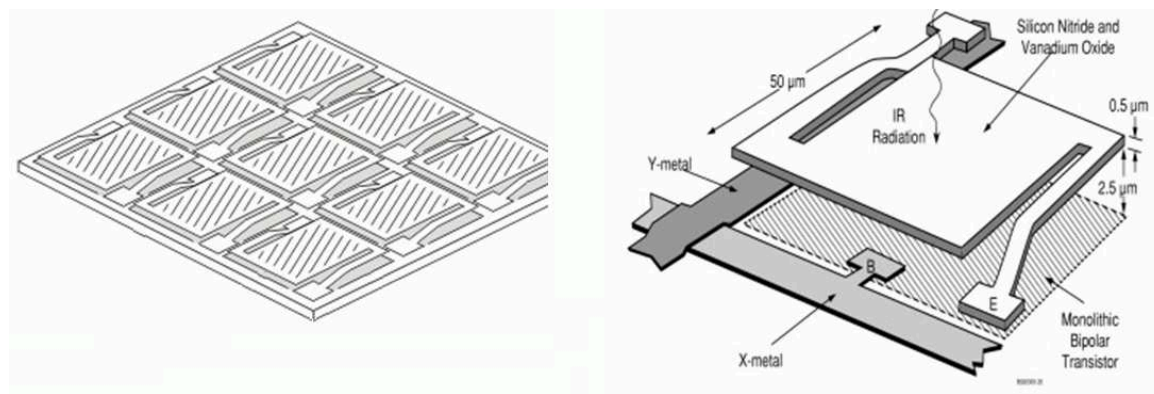
Pokud jde o bolometry, používá se majoritně dvou provedení, první je termistorové a pak vrstvé. Elementy pak mohou být kovové, dielektrické, polovodivé a supravodivé. U termistorových je napařena odporová dráha pod absorpční vrstvou, používá se MnO, NiO, TiO<sub>2</sub>. U vrstvových je to pak chalkogenidové sklo  $\text{Ti}_2\text{SeAs}_2\text{Te}_3$ . Pro přesnější vyhodnocování se používá můstkového zapojení, kde část můstku je ke kompenzaci, nebo jako reference.



Obr. 21 Struktura bolometru s můstkem

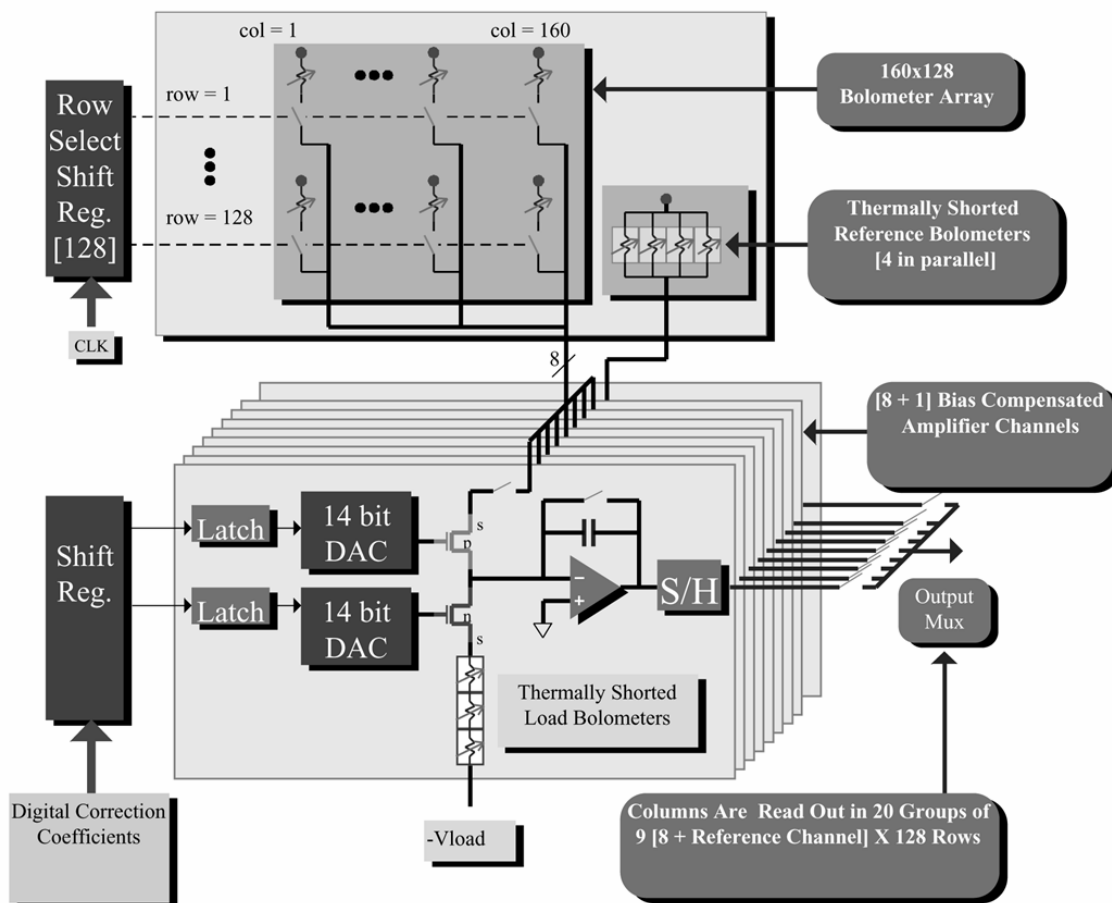
Příklad ukázky provedení bolometru můžeme vidět na Obr. 21.

Pro mikrobolometrické snímače, které jsou dnes velice rozšířené, se jedná o kombinaci bolometru, které jsou rapidně zmenšeny a uloženy do maticového uspořádání. Toto uspořádání se většinou označuje jako FPA (focal plane array). Provedení a detail jednoho prvku je vidět na následujícím obrázku Obr. 22. Zobrazená ploška se pak chová jako klasický bolometr. Její uchycení ve struktuře slouží jako kontakty do vyhodnocovacích obvodů. Izolantem pro odstínění je vzduch.



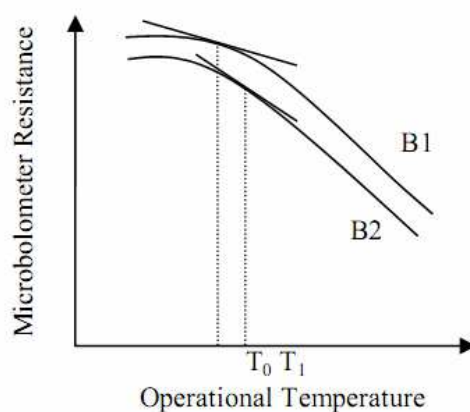
Obr. 22 Mikrobolometr s detailem na jeden prvek

Příklad struktury, která slouží pro vyčítání z maticového pole je uveden na následujícím obrázku. Většinou je tato technologie pak implementována přímo na čip a obsahuje několik částí celého obvodu. Jsou zde zesilovače kanálů, referenční bolometry, převodníky, registry a další. Příklad je uveden pro pole 160 x 128 bodů.[28]



Obr. 23 Obvody pro úpravu signálu z mikrobolometru

Jako hlavní požadavek mají jednotnost pracovní teploty elementů. Hlavním zdrojem rušení je pak teplota substrátu snímače. Rozdílné pracovní teploty snímačů pak můžou vypadat dle následujícího obrázku.



Obr. 24 Dvě rozdílné teploty pro dva různé elementy maticového snímače

Je zde více faktorů, které způsobují nejednotnost těchto teplot. Na potlačení se používají dvě metody, jedna je konstantního proudu a jedna konstantního napětí. Častěji pak konstantního napětí, kdy při rozdílnosti křivek elementů a rozdílnosti pracovní teploty se uplatňuje dvoubodová korekční metoda. Kdy rozdílný offset je odečten a zesilovací činitel je násoben. Pak dostáváme normalizovaný signál z detektoru.[27]

Pokud chceme počítat teplotu pro jednotlivý bolometr, či element, pak můžeme vycházet z následující zjednodušené rovnice.

$$\alpha \cdot E(t) = C \frac{d}{dt} [\Delta T(t)] + \frac{1}{R} \cdot \Delta T(t) \quad (48)$$

Kde část před rovnáse odpovídá dopadajícímu záření, C je tepelná kapacita elementu a R je tepelný odpor. Uvažujeme pak, že  $\Delta T$  je kladný, protože teplota elementu je vyšší než okolí. O kolik se pak změní odpor jednotlivého elementu závisí na fyzikálních vlastnostech použitého materiálu.[19]

## 2.6 TERMOKAMERY

Pro měření v praktické termodiagnostice jsou používány termozobrazovače, častěji nazývány termokamery. Jde o celek snímače s vyhodnocovanými obvody, zobrazovací jednotkou, optikou a výstupním sériovým rozhraním. Praktická podoba celku je vidět na následném obrázku Obr. 25. Zde je také vidět rozdíl mezi počátkem těchto přístrojů a současností.



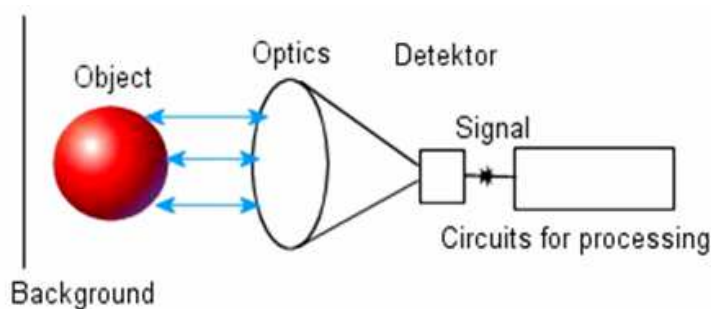
Obr. 25 Termokamera, pohled na minulost a současnost

V minulosti se používaly jen chlazené snímače a váha celého systému přesahovala přes 70 kg. Nyní ty nejmenší kamery pro kontrolu ve stísněných prostorech váží méně než kilogram a to i s baterií.[6]

Základní částí kamery je snímač. Jeho druhy jsou popsány v předchozích kapitolách. Dnes zobrazovače fungují jako klasická kamera pro snímání viditelného pásma. Používá se FPA detektorů a to hlavně s mikrobolometrickým uspořádáním. Dříve byly používány skenovací mechanismy, ale ty už jsou dneska používány minimálně. U těchto mechanismů byla komplikovaná optická část, kdy k rozkladu obrazů docházelo mechanickou cestou. Pokud bychom celý systém klasické kamery chtěli pospat blokově, tak jeho upořádání může



být dle následujícího obrázku Obr. 30.[30]



Obr. 26 Blokové schéma kamery

Katedra elektroenergetiky vlastní kameru Flir E45. Proto je pro praktickou ukázkou parametrů kamery použit právě tento přístroj. Jde o malou kameru, která je určena pro praktickou diagnostiku ve stísněných prostorech, např. pro obor elektroenergetiky se hodí na kontrolu rozvaděčů a rozvodných polí.

Její parametry jsou:

- spektrální citlivost 7,5 – 13  $\mu\text{m}$
- rozsah teplot -20 až 100°C, 0 - 250°C, 120 – 900°C
- váha 0,7 kg
- snímač mikrobolometrický nechlazený 160\*120 bodů
- pracovní teplota -15 až 50°C
- přesnost  $\pm 2^\circ\text{C}$
- citlivost 0,1°C
- krytí IP 54
- výdrž baterií 1,5 – 2 h
- komunikační rozhraní RS 232, CVB
- paměť 200 snímků

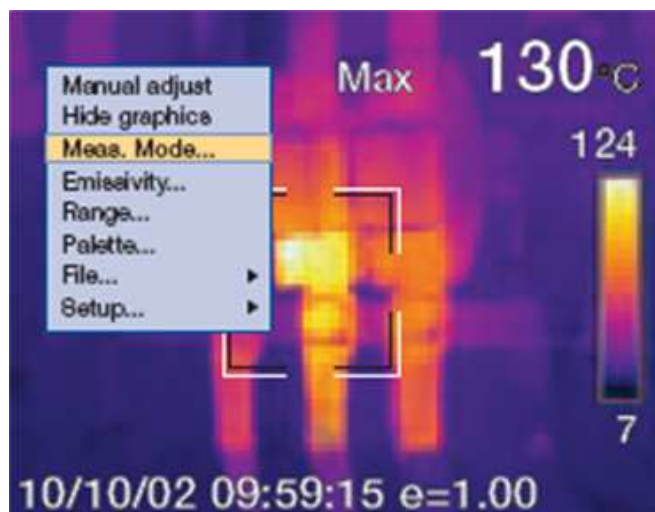
Kamera pak vypadá následovně Obr. 27.[6]



Obr. 27 Termokamera FLIR E45

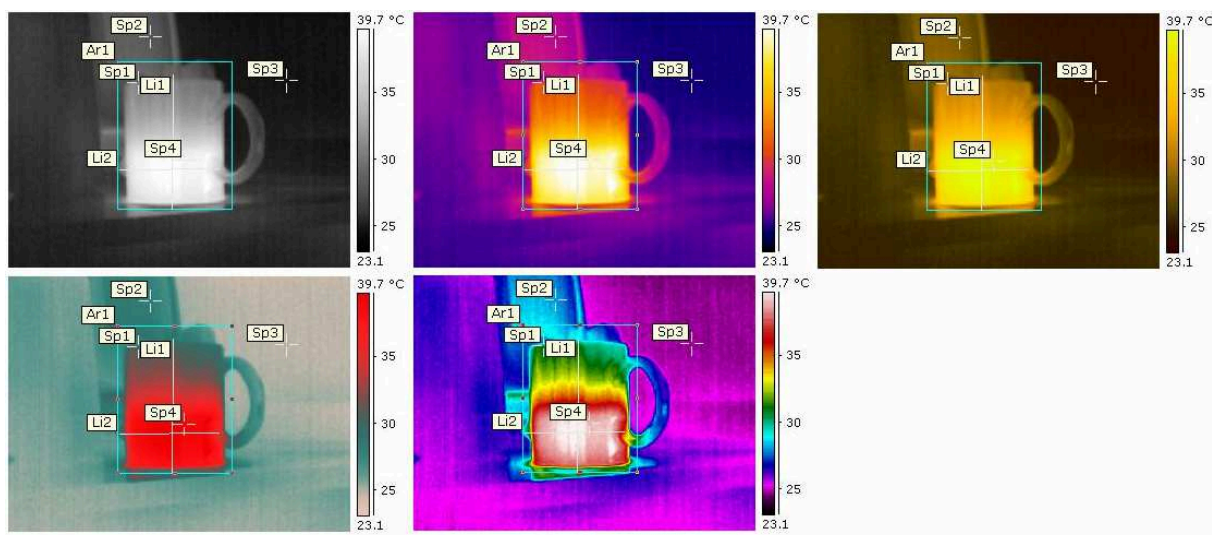
Přistoupíme-li prakticky k měření a pokud kameru uchopíme a podíváme se na její horní část,

pak této části dominuje menší displej. Jeho rozměr je 2,5''. Na tomto displeji se pak zobrazují měřené hodnoty a přes tento prvek, se pak volí umístěnými pod ním, nastavují režimy měření, paleta barev, rozsahy teplot, emisivita atd. Jde se přes něj dívat i na zachycené obrazy. Pro příklad je na Obr. 28 reálný snímek displeje.



Obr. 28 Snímek displeje

V poslední části této podkapitoly jsou ještě krátce uvedeny možnosti post-processingu. Kamera obsahuje sériové rozhraní RS 232 (dnes nejčastěji USB) a pomocí tohoto rozhraní je jí možno připojit k počítači. Součástí přístroje je i analytický software, který se jmenuje ThermoCAMReporter, tento software funguje jako plug-in pro MS Word, kde pomocí v něm obsažených nástrojů provádíme analýzu jednotlivých snímků. Snímky se ukládají ve formátu \*.jpg. Pro ukázkou jsou na Obr. 29 uvedeny základní palety falešných barev pro zobrazení izotepelních ploch, které nám pomáhají odhalit teplotní anomálie.



Obr. 29 Příklad barevné palety pro snímky

Více informací o postprocessingu se dozvíte v [30]. Samozřejmě ostatní výrobci kamer dodávají jiné programy, a proto je zpracování termogramů u různých kamer prováděno rozdílně.

## 2.7 SIMULACE

Součástí této práce jsou také simulace dějů, ke kterým bylo využito metody konečných prvků. Tato metoda je obecně známá a využívá ji mnoho simulačních programů. Byla navržena pro řešení strukturálních problémů. Pro naše děje, kde se budeme soustředit hlavně na ustálené pochody, budeme využívat program ANSYS Workbench. Tento program je všestranný program, který je určen pro velkou paletu použití. V našem případě se budeme soustředit na elektrostatické děje a mechanické děje.

Metoda konečných prvků vychází z toho, že simulovaný objekt rozdělíme do určitého počtu elementů. Tyto elementy pak přebírají vlastnosti reálného prvku a nahrazují jeho chování v dané části. Dle použitých simulací a dějů se uzpůsobuje tvar elementů a vlastnosti které nesou. Dále musíme nastavit okrajové podmínky a další důležité parametry pro výpočet. Vlastní výpočet pak řeší vzájemné interakce jednotlivých elementů v prostorovém uspořádání.

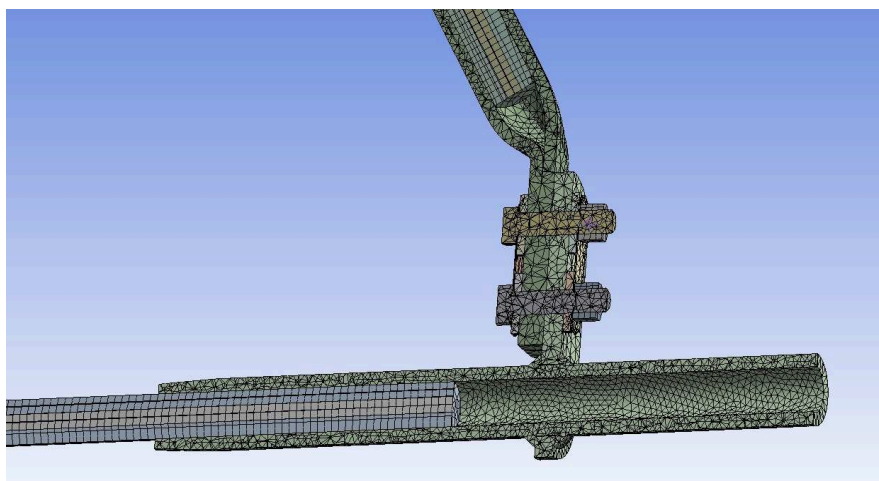
Celkový návrh a řešení úloh se skládá z několika částí.

- První je vytvoření modelu v geometrických rozměrech, pro náš případ ve 3D. Tento model se převede do sítě elementů.
- Druhá je volba řešitele a zadání parametrů pro řešení. V našem případě Thermal-electric a Static-structural. Kde zadáváme pro elektrickou část materiály, proud, napětí a součinitel přestupu tepla, pro mechanickou část zadáváme materiály, druh zatížení (tlaky, dilatace, síly...), ukotvení. Následně se zadává požadovaná forma výstupu dat.
- Poslední fáze je analýza výsledků, které program vyřešil.

Na následujícím obrázku (číslo) je pak možné vidět vysítovaný model svorky. Je zde použito metody sizing, kdy zadáváme velikost elementu pro jednotlivé části. Program si pak sám dopočítává elementy nutné pro propojení částí navzájem.

Rozeznáváme tři druhy okrajových podmínek:

1. **Dirichletovy okrajové podmínky prvního druhu** – pro náš případ to může být stálá teplota v bodě nebo rozhraní, nebo teplota funkcí času  $T(x,y,z,t)$ .
2. **Neumannovi okrajové podmínky druhého druhu** – pro vedení tepla to může být normálová derivace tepoty (tepelný tok).
3. **Smišené okrajové podmínky třetího druhu** – zde jde o kombinaci zadání tepla a tepelného toku na hranici.[29]



Obr. 30 Vysítovaný model svorky

Samotná metoda konečných prvků pak navazuje na numerické řešení problémů. Kdy výpočet spočívá v řešení parciálních diferenciálních rovnic například vedení tepla. Zde okrajové podmínky aproximujeme konečnými diferencemi Taylorova rozvoje v bodech zájmu. Tyto výpočty jsou pro rozsáhlé struktury velice časově náročné. Rozeznáváme dva druhy numerického řešení. První je **direct solution method**, kde je vytvořena následující maticová rovnice.

$$[A]\{T\} = \{F\} \quad (49)$$

Pro vedení tepla je matice A nazývána koeficientní maticí, matice T je matice neznámých teplot a F je matice konstant. Tato maticová rovnice se pak řeší například Gaussovou eliminační metodou. Druhý typ řešení je **iterative solution method**, kdy jednou z nejpoužívanějších metod pro řešení je Gauss-Siedelova metoda. Kdy úloha se řeší tak dlouho dokud difference dvou po sobě jdoucích řešení je menší než zadaná hodnota přesnosti výpočtu.

Další informace pro výpočty už budou uvedeny v praktické části této práce.

### 3 TERMOGRAFICKÁ MĚŘENÍ

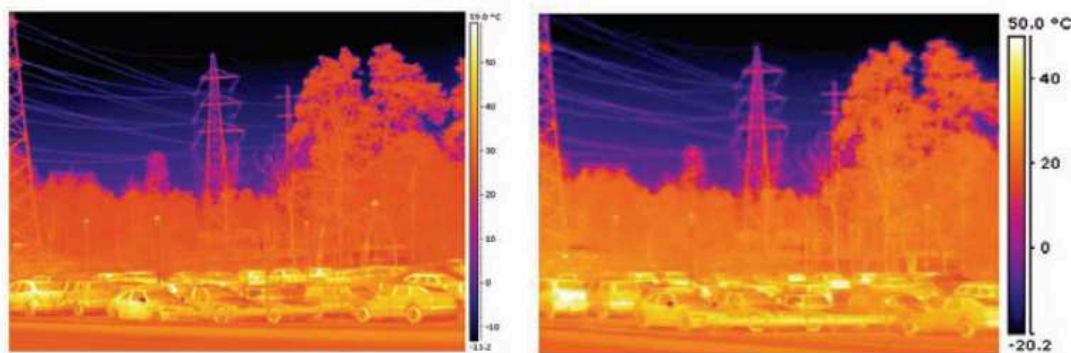
Termografii bereme jako metodu měření teplot, kdy určíme tepelné pole zvoleného povrchu. Máme základní dva typy termografie a to je kontaktní a bezkontaktní. V kontaktní metodě je teplota měřena kontaktně například termočláňkovým senzorem a přímým dotykem senzoru s povrchem. V bezkontaktní metodě používáme pyrometry a v nejlepším případě termozobrazovače (termokamery). V metodě zobrazení tepelného pole je povrch rozdělen do elementární sítě a v jednotlivých uzlech se měří teplota. Po změření všech hodnot dostáváme teplotní pole. U termokamer pak můžeme vynechat složité měření v bodech a dostáváme přímo obraz tepelného pole v syntetických barvách, které zastupují jednotlivé teploty. Kontaktním metodám se již nadále nebudeme věnovat.

V další části se budeme zabývat bezkontaktním měřením teploty a to hlavně měřením pomocí termokamer. V předchozích částech jsme si popsali jednotlivé zákony pro přenos tepla zářením. Při bezkontaktním měření se právě využívá těchto zákonů.

Ve skutečnosti ideální těleso neexistuje a na vyzařování tělesa má vliv několik parametrů. Pro přesné měření tyto parametry musíme akceptovat a nastavit je na používaném měřicím přístroji. Tyto parametry nám popisují povrchové vlastnosti tělesa a vlastnosti jeho okolí. Nejdůležitějším parametrem je emisivita, dále uvažujeme rychlost proudění vzduchu v okolí objektu, vlhkost vzduchu, odraženou teplotu, teplotu vzduchu, pozorovací úhel a vzdálenost od objektu.

Důležité údaje, které dále musíme dodržet, abychom získali přesné výsledky, jsou provozní údaje termozobrazovače. Jedná se hlavně o tepelné ustálení přístroje, kterého dosáhneme ponecháním přístroje v prostředí, ve kterém budeme měřit.

Tepelné pole zobrazujeme graficky pomocí izotermických ploch, které jsou barevně odlišeny. Kvalita zobrazení teplot pomocí falešných barev závisí na rozlišení tepelného snímáče [2]. Na následujícím obrázku Obr. 31 je vidět, jak se projeví rozlišení snímáče na kvalitě obrazu. Často se také provádí interpolace snímků, což také upravuje jejich podobu.



Obr. 31 Vlevo rozlišení 640 x 480 bodů a vpravo 320 x 240 bodů

V následujících částech se pak budeme věnovat nastavovaným parametrům. Specifikace parametrů pak vychází pro měření v oblastech elektroenergetiky, kdy většina prvků je vyhřívána protékajícím proudem. Zde se bude jednat o elementární nastavení, poté bude věnována pozornost praktickým problémům při měření.

#### 3.1 EMISIVITA

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů, který nám ukazuje schopnost materiálu objektu vyzařovat záření v porovnání s černým tělesem. Je to bezrozměrný parametr, kdy hodnota 1 odpovídá černému tělesu a hodnota 0 odpovídá nulové schopnosti vyzařovat.

Absolutní hodnoty emisivit jsou určovány laboratorně a mění se změnou teploty. Tento parametr je také spektrálně a směrově závislý. Naštěstí u běžně měřených materiálů je tato změna velice pozvolná a můžeme si ji dovolit zanedbat, pokud dodržíme některé předpoklady. Např. k měřenému povrchu stojíme co nejvíc ve směru jeho normály. Teorii k tomuto parametru jsme definovali v oddílu 2.4.

U materiálů s matným povrchem je většinou emisivita vyšší (až 0,8), u lesklých materiálů je hodnota velice nízká (menší než 0,1). U nízkých hodnot se materiály chovají jako tepelná zrcadla a vyzáří méně energie, než odrazí. Což však komplikuje měření. Příklady emisivit jsou uvedeny v Tab. 4. Vhodným nastavením pak dostaneme vypovídající výsledky měření.

Tab. 4 Příklady emisivit z více zdrojů

<b>Hodnoty emisivity běžných materiálů</b>			
	<b>Zdroj Fluke [5]</b>	<b>Zdroj Newreport [3,4]</b>	<b>Zdroj Flir [6]</b>
<i><b>Materiál</b></i>	<i><b>Emisivita</b></i>	<i><b>Emisivita</b></i>	<i><b>Emisivita</b></i>
<b>Hliník, leštěný</b>	0,05	0,09	0,05
<b>Hliník, hrubý povrch</b>	0,07	0,18	0,18
<b>Hliník, silně zoxidovaný</b>	0,25	0,20	0,20
<b>Asbestová deska</b>	0,96	0,96	0,96
<b>Asbestová tkanina</b>	0,78	0,90	0,78
<b>Asbestový papír</b>	0,94	0,93	0,93
<b>Mosaz, matná, zašlá</b>	0,22	0,40	-
<b>Mosaz, leštěná</b>	0,03	0,04	-
<b>Měď, leštěná</b>	0,01	0,03	0,03
<b>Měď, černě zoxidovaná</b>	0,88	0,78	0,78
<b>Železo, zoxidované</b>	0,74	0,74	0,74
<b>Nikl, čistý, leštěný</b>	0,05	0,05	0,05
<b>Platina, čistá, leštěná</b>	0,08	0,05	0,05
<b>Ocel, silně zoxidovaná</b>	0,88	0,80	0,82
<b>Voda</b>	0,98	0,67	0,95

### 3.2 OSTATNÍ PARAMETRY

Zvažujeme-li další jmenované parametry, máme dvě možnosti. První možnost je, zavést korekční součinitele pro jednotlivé parametry [6]. Druhá možnost je, držet se následujících pokynů. Co bychom měli dodržet:

- Rychlost větru menší než  $4 \text{ m.s}^{-1}$ .
- Zatížení alespoň 50 %.
- Provoz zařízení déle jak 40 min.
- Správné zaostření.
- Rozdíl okolní a provozní teploty větší jak  $10^{\circ}\text{C}$ .

- Relativní vlhkost prostředí by neměla přesáhnout 100 %.
- Přesné zjištění provozního stavu a zatížení.
- Snímat kolmo k měřenému povrchu

Nedodržením předepsané rychlosti větru dochází k většímu chlazení povrchu vlivem zvýšení součinitele přestupu tepla povrchu a plocha pak má měřenou teplotu menší teplotou než u stavu, kdy proudění je minimální. Dále je potřebné odpovídající zatížení pro odhalení problému, kdy v inkriminované části dochází k nadměrné produkci tepelného záření. Nedostatečné proudové zatížení může některé problémy ukrýt. Při nedostatečném rozdílu provozní teploty a teploty okolí mohou jednotlivé části měřeného objektu zanikat na přirozeném tepelném pozadí. Nadměrná vlhkost mění propustnost atmosféry a změnou snímacího úhlu dochází ke změně emisivity.

Většinu z výše uvedených podmínek, pak pro prostředí, ve kterém se provádějí energetická měření, není problém splnit. Zjištění provozního stavu provádíme měřením, nebo odečtením z panelových přístrojů rozvaděče.

### 3.3 DEFINICE STAVU ZAŘÍZENÍ

Vlastní diagnostika spočívá v kontrole veškerých částí zařízení, která by vlivem poruchy měnila svou teplotu. Hodnoty teploty pak ukazují, v jakém stavu se zařízení nachází. V oblastech energetiky se může jednat o stavy:

- Provozní stav – zařízení je v běžném pracovním režimu.
- Přetížení - zde se může jednat o dva stavy. První možnost je, že přehřátí jednoho zařízení indikuje poruchu dalšího, které pracuje společně s měřeným a tím je zařízení přetěžováno. Druhá možnost ukazuje na nedovolené přetížení vlivem velkého zatížení.
- Závada - mezní stav, který je potřeba ihned opravit, jde o stav, který se abnormálně teplotně vymyká předchozím stavům

Další dělení může být vytvořeno dle nutnosti změny aktuálního stavu. Provádíme manipulace, opravy, nebo výměny. Vymezení uděláme dle nalezené hodnoty oteplení od provozního stavu.

- 1. stupeň –  $0^{\circ}\text{C} < \Delta t < 10^{\circ}\text{C}$   
Tento stav bereme jako provozní.
- 2. stupeň –  $10^{\circ}\text{C} < \Delta t < 35^{\circ}\text{C}$   
Tento stav bereme jako přetížení, nutno opravit při revizi.
- 3. stupeň –  $35^{\circ}\text{C} < \Delta t < 100^{\circ}\text{C}$   
Tento stav může být přetížením nebo počínající poruchou, pokud je zatížení menší než 60 %, pak bude oprava nutná co nejdříve, protože očekávaná teplota se při maximálním zatížení mnohem zvýší. Pokud je větší než 60%, pak naplánovat opravu co nejdříve.
- 4. stupeň –  $\Delta t > 100^{\circ}\text{C}$   
Tento stav je kritický, naléhavost roste s teplotou.

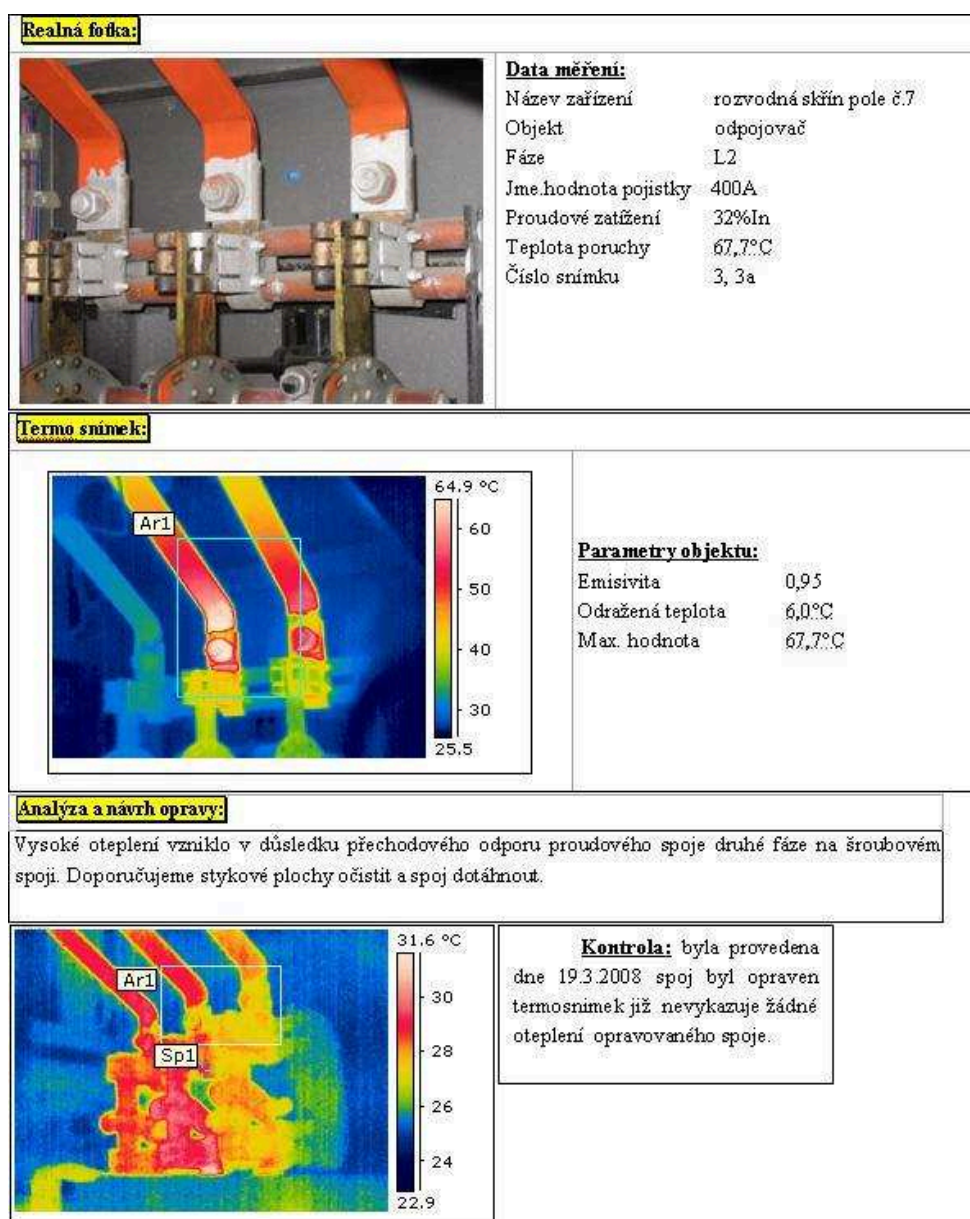
Předchozí meze teploty bereme pro naměřené teploty na svorkách, kontaktech, vodičích atd. Pro posouzení teplot při provozním stavu točivých strojů, transformátorů, tlumivek atd. vycházíme z hodnot daných normami [7]. Hodnoty v normách nám uvádějí maximální provozní teploty pro jednotlivé stroje v daných místech. Pro určení teploty z normy je potřeba znát typ stroje, druh zatížení a místo, kde se teplota měří. Můžeme uvést příklad, kde u valivých ložisek by teplota neměla přesáhnout  $100^{\circ}\text{C}$ , a kluzná ložiska mají



mez 80 °C. Pro provozní teplotu vodičů bereme hodnoty mezních teplot dle tabulky v příloze [9]. U vodičů nebývá většinou problém s oteplením proudovodné dráhy podél vodiče, ale se zvýšením teploty ve spojích. To je dáno např. znečištěním povrchů kontaktů, stárnutím kontaktního materiálu, nedostatečnou přitlačnou silou atd.[10]

### 3.4 PROTOKOL Z MĚŘENÍ

Jako výstup z provedeného měření slouží protokol. Zde je zaznamenána provedená diagnóza dle bodů 3.3 a všechny ostatní důležité informace. Protokol se může lišit formou, ale informace v něm obsažené by měly být stejné. Základním kamenem protokolu jsou dva snímky, jeden ve viditelné oblasti a jeden v IR oblasti. Tyto snímky doprovází informace o místě měření, měřeném zařízení, provozním stavu zařízení, naměřené hodnoty veličin, obecné informace (datum, čas), nastavené hodnoty a na závěr vyhodnocení měření. Příklad protokolu je uveden na Obr. 32.

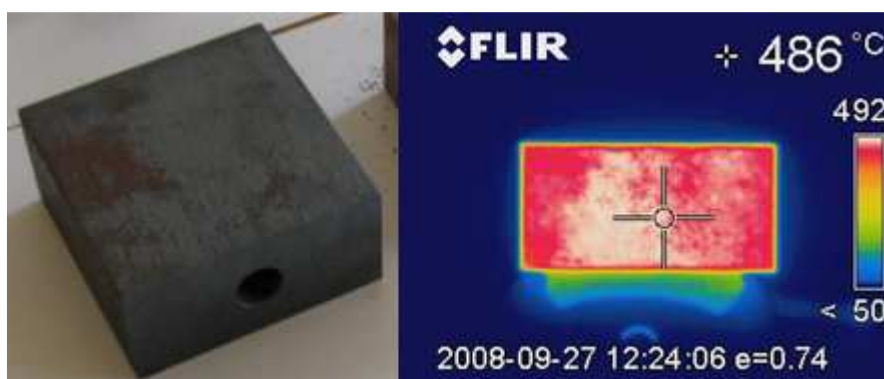


Obr. 32 Protokol z měření v rozvodně školy



## 4 PROBLÉMY PRAKTICKÉ TERMODIAGNOSTIKY

V předešlých částech jsme jmenovali co je potřeba udělat, abychom udělali co nejpresnější měření. Řekli jsme, že většinou není problém veškeré podmínky dodržet, ale je potřeba se na tyto parametry podívat více zeširoka. Jak už bylo řečeno, nejdůležitější parametr pro nastavení je emisivita. Její hodnotu samozřejmě můžeme nastavit přesně, ale musíme znát měřený materiál, což bývá největší zádrhel. Pokud materiál neznáme, pak ho musíme odhadnout a to může být zdrojem pochybností.



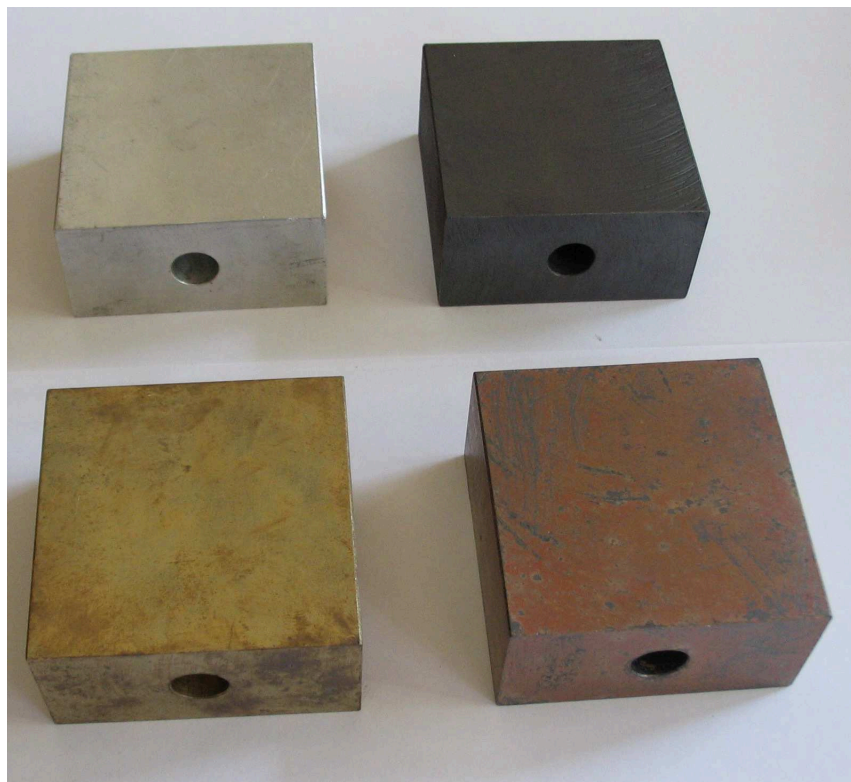
Obr. 33 Povrchová oxidace materiálu železo

Dalším negativním faktorem je povrchová oxidace materiálů, které podléhá většina používaných materiálů. Jak se mění schopnost materiálu vyzařovat, když je jeho povrch částečně oxidován, můžeme vidět na Obr. 33. Pokud máme měřit takto nestejnorodý povrch je většinou velice těžké určit, které místo je vztažné. Je několik možností, jak určit přesně emisivitu daného povrchu. Pokud vynecháme laboratorní určení, pak se nabízí použití referenčních štítků a barev, které se nanášejí nebo lepí na povrch a mají přesně danou hodnotu parametru. Další známou možností je vrtání otvoru do materiálu, kdy vrtaný otvor musí mít svou hloubku asi 5 krát větší než šířku a pak se chová jako černé těleso. Pokud však tyto možnosti shrneme, tak pro termodiagnostiku prováděnou na systémy, které jsou trvale pod vysokým napětím, je velice obtížné něco na povrch umístit a navíc málo kdo si nechá do zařízení vrtat díry. Dalším důležitým aspektem je pracovní bezpečnost při měření v provozu.

### 4.1 MATERIÁLOVÁ OXIDACE POVRCHŮ MĚŘENÝCH PLOCH

V této podkapitole se zaměříme na měření oxidovaných povrchů a stanovení správné emisivity u několika druhů kovů. V praxi se často setkáváme s tím, že při měření je homogenita teploty povrchové plochy, která by měla zářit stejnou teplotou, značně narušená. Může to být způsobeno několika případy jako jsou odrazy, znečištění a oxidace, které mají vliv na emisivitu. Nejčastějším důvodem je však oxidace a to zvláště u objektů, které podléhají přímým atmosférickým vlivům. Částečně jsme si zmínili o problému již dříve, ale v následujících částech se na tento problém podíváme v několika případech detailněji.

Byly zvoleny čtyři materiály železo, měď, dural a mosaz. Tyto materiály byly připraveny ve formě monolitických kvádrů o určitých rozměrech. Vždy existuje menší a větší kvádr pro měření. Materiály mají zoxidované povrchy a tyto povrchy byly v prvním kroku očištěny a poté vloženy do pece, kde byly zahřáty na 500 °C. Po prohřátí vzorku byl vytažen a ihned byly pořízeny snímky termokamerou. Pecní prostředí pomohlo zrychlit jejich povrchovou oxidaci. Fotky materiálů, ve viditelném spektru, před vložením do pece a po vložení do pece můžete vidět na následujících dvou obrázcích Obr. 34, Obr. 35.



**Obr. 34** Fotka materiálů před vložením do pece (toto jsou větší kvádry)



**Obr. 35** Fotky po vytažení z pece

Snímky termokamerou provedl autor zdroje [31]<sup>\*</sup>. Další analýza bude součástí této práce. V následujících částech probereme rozbor těchto čtyř materiálů za pomoci programů

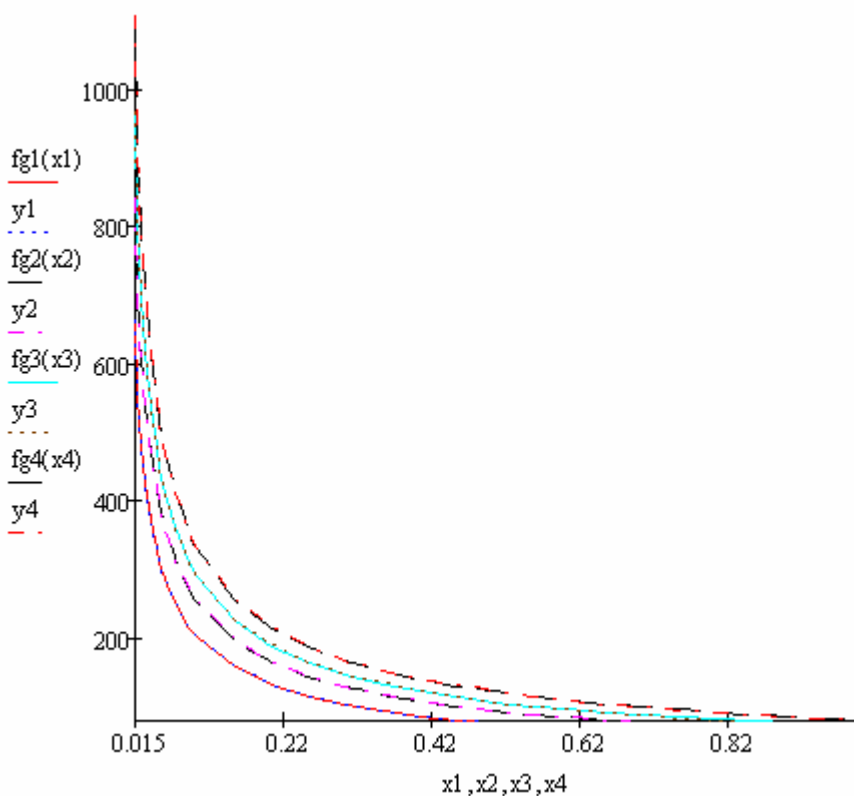
---

<sup>\*</sup> Děkuji Ing. Královi za poskytnuté informace

ThermaCam Reporter [32] a Mathcad [33]. ThermalCam Reporter posloužil k základnímu zpracování termogramů a v programu Mathcad byly naprogramovány funkce a procedury pro výpočet povrchové emisivity u jednotlivých vzorků. Celý proces vychází z úvahy, že teplota povrchu daného materiálu by měla být stejná. Nebere se celá plocha termogramu, ale jen úsek snímané plochy kovu bez okrajových částí, které by mohly být chladnější. Předpokládá se mírné snížení povrchové teploty po vytažení, a proto bude analýza prováděna pro 470 stupňů. Celkový postup pak stanovuje rozložení emisivity po této ploše za předpokladu předcházejících úvah. První částí je jednoduchá analýza v ThermalCam Reporteru a následuje úprava v Mathcad.

#### 4.1.1 POPIS VYTVOŘENÝCH PROCEDUR A FUNKCÍ POUŽITÝCH V ROZBORU

Jelikož není přesně známo jak termokamera přepočítává teplotu při změně emisivity, což je základní požadavek pro určení správné emisivity povrchu, byla v programu ThermalCam Reporter odečtena teplota v několika bodech pro celý rozsah emisivity. Z těchto hodnot byla určena regresní funkce teploty v bodech v závislosti na emisivitě. A to tak, že byly zkoušeny známe regresní funkce, kde pro jednotlivé regrese se určoval rozdíl mezi regresní funkcí a skutečnou funkcí.



Obr. 36 Ukázka průběhu teploty a regresní funkce ve 4 bodech (osa x – emisivita, osa y – teplota)

Nejlépe vyšla mocninná regresní funkce s předpisem (50). Ukázka průběhu hodnot teploty v závislosti na emisivitě a průběhu regresní funkce v závislosti na emisivitě, ve čtyřech bodech, je vidět na Obr. 36.

$$f(x) = a \cdot x^b + c \quad (50)$$

Parametry **a**, **b** a **c** u regresní funkce (50) závisí na hodnotě intenzity záření v daném měřeném bodě a na dalších korekčních parametrech, které se při měření nastavují do kamery. Proměnná  $x$  odpovídá emisivitě a  $f(x)$  odpovídá výsledné teplotě při nastavené emisivitě. Hodnoty chyb regrese jsou uvedeny v Příloze 1., kde maximální chyba je 0,88 °C.

Dalším krokem bylo vytvoření procedury pro stanovení správné emisivity. Ta vychází z předchozí regrese a používá předpokladu, že známe hodnotu teploty v daném bodě, hodnotu nastavené emisivity a teplotu, kterou by měl povrch v daném bodě mít. Tento předpoklad vede na soustavu rovnic. Z regresní analýzy pak ještě vyšla lineární závislost parametru **a** na teplotě při emisivitě  $e = 1$ , která je uvedena vztahem (51).

$$a(f(1)) = -1,64783119 + f(1) \cdot 0.93034797 \quad (51)$$

Dále byl stanoven následující předpoklad, který také vyšel z analýzy.

$$f(1) = a + b + c \quad (52)$$

Tyto předpoklady nám zjednoduší rovnice pro řešení parametrů v bodě, na soustavy dvou rovnic o dvou neznámých. V nich je parametr **a** určen dle (51) a řešíme pouze **b** a **c**. Rovnice odpovídají vztahům (50) a (52), a pro jejich vyřešení je potřeba znát, kromě předchozích hodnot, také teplotu v daném bodě při emisivitě 1. Procedura poté v cyklu pro všechny body řeší bodově určení parametrů regresní funkce, poté jsou následně parametry dosazeny do regresní funkce a je určena hodnota korektní emisivity pro danou teplotu  $T$ . Tělo procedury Opti( $e, A, B, T, ro, co, \Delta$ ) pro určení emisivity v programu Mathcad vypadá následovně Obr. 37.

```

OptiE(e, A, B, T, ro, co, Δ) :=
  i ← 0
  j ← 0
  E ← 0
  Te ← 0
  T1 ← 0
  g ← 0
  for i ∈ 0..ro - 1
    for j ∈ 0..co - 1
      Te ← Ai,j
      T1 ← Bi,j
      a ← -1.64783119 + T1 · 0.93034797
       $\begin{pmatrix} b \\ c \end{pmatrix} \leftarrow \text{ggg}(Te, T1, a, e, \Delta)$ 
       $V_{i,j} \leftarrow \left( \frac{T - c}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$ 
    return V

```

Obr. 37 Program pro stanovení emisivity

Procedura obsahuje vstupní proměnné  $e$  - emisivita,  $A$  - matice teplot pro nastavenou emisivitu,  $B$  - matice teplot pro emisivitu 1,  $T$  - teplota, dle které se určuje korektní emisivita,  $ro$  - počet řádků matice teplot v bodech plochy,  $co$  - počet sloupců matice teplot plochy,  $\Delta$  - počet desetinných míst, na které se má řešit numerický výpočet kořenů rovnice. Podmínka je, že matice  $A$  a  $B$  jsou pro stejnou vybranou plochu. Procedura obsahuje podproceduru  $ggg(Te, T1, a, e, \Delta)$ , která numericky řeší rovnice pro získání parametrů v jednom bodě. Její tělo je vidět na následujícím obrázku.

```

ggg(Te, T1, a, ee, Δ) :=
    b ← 0
    j ← 0
    f ← 0.1
    while (Te - a·eeb) - (T1 - a - b) ≥ Δ
        break if j = 1000000
        j ← j + 1
        b ← b - f
        break if |(Te - a·eeb) - (T1 - a - b)| < Δ
        if (Te - a·eeb) - (T1 - a - b) < Δ
            b ← b + f
            f ← f/10
    c ← T1 - a - b
    return (b, c, j)

```

Obr. 38 Podprocedura pro numerické řešení rovnice

Podprocedura obsahuje vstupní parametry  $Te$  - teplota v daném bodě při emisivitě  $ee$ ,  $T1$  - teplota v daném bodě při emisivitě 1,  $a$  - je hodnota parametru  $a$ ,  $\Delta$  - má stejný význam jako v předchozím případě.

Další procedurou, která byla vytvořena je procedura pro určení maximálního rozdílu dvou sousedních bodů emisivity. Tato procedura je ukázána na Obr. 39. Jako jediný vstupní parametr je matice hodnot emisivity.

Všechny uvedené procedury byly použity pro následující analýzu jednotlivých povrchů vybraných kovů. Vypočtené výsledky budou zobrazeny v následujících podkapitolách.

Hodnoty teplot pro jednotlivé kovy jsou v Příloze 2. Příloha 2 obsahuje matice teplot pro jednotlivé kovy, jsou to vstupy pro procedury na určení správné emisivity. Vždy tři matice (tři soubory) pro kov. První soubor ukazuje teplotu celého termogramu, název souboru má před koncovkou \*.csv uvedeno slovo Cela (není důležitá pro výpočet). Druhá ukazuje matici teplot při emisivitě 1 pro výběr z celého termogramu a soubor má před koncovkou \*.csv slovo Vyber. Třetí ukazuje matici teploty pro různou emisivitu výběru (pro celý soubor je stejná), soubor má před koncovkou \*.csv uvedenou Vyber0\_52, kde číslo udává hodnotu emisivity 0.52.

```

NejHrana(M) :=
  i ← 0
  j ← 0
  b ← 0
  for i ∈ 0..rows(M) - 1
    for j ∈ 0..cols(M) - 2
      b ←  $|M_{i,j} - M_{i,j+1}|$  if  $b < |M_{i,j} - M_{i,j+1}|$ 
  for i ∈ 0..rows(M) - 2
    for j ∈ 0..cols(M) - 2
      b ←  $|M_{i,j} - M_{i+1,j+1}|$  if  $b < |M_{i,j} - M_{i+1,j+1}|$ 
      b ←  $|M_{i,j+1} - M_{i+1,j}|$  if  $b < |M_{i,j+1} - M_{i+1,j}|$ 
  for i ∈ 0..rows(M) - 2
    for j ∈ 0..cols(M) - 1
      b ←  $|M_{i,j} - M_{i+1,j}|$  if  $b < |M_{i,j} - M_{i+1,j}|$ 
  return b

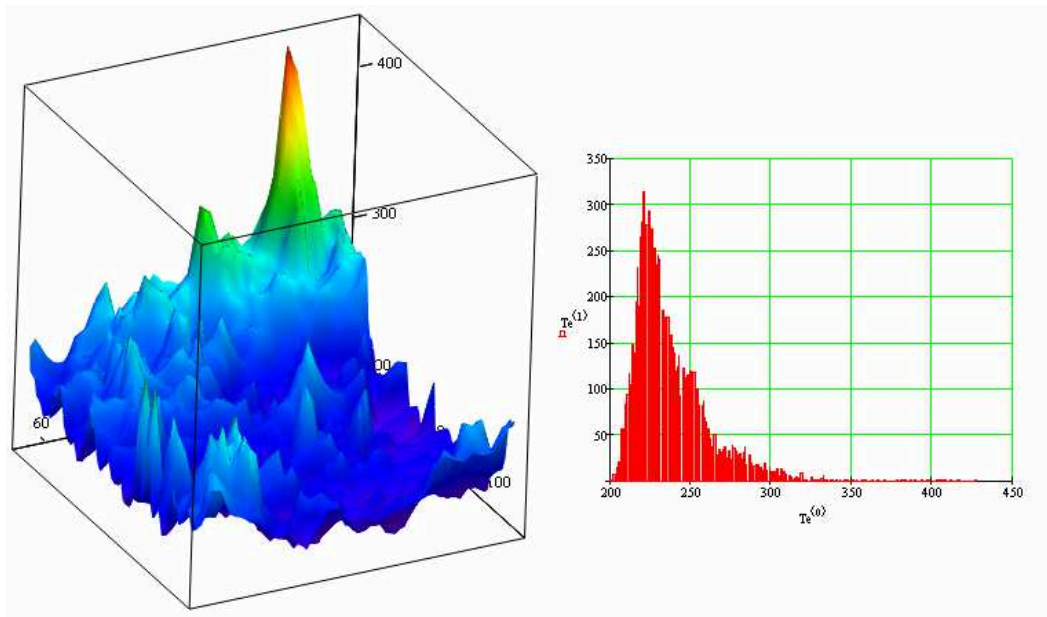
```

Obr. 39 Procedura pro určení maximálního rozdílu emisivity v sousedních bodech

#### 4.1.2 DURAL

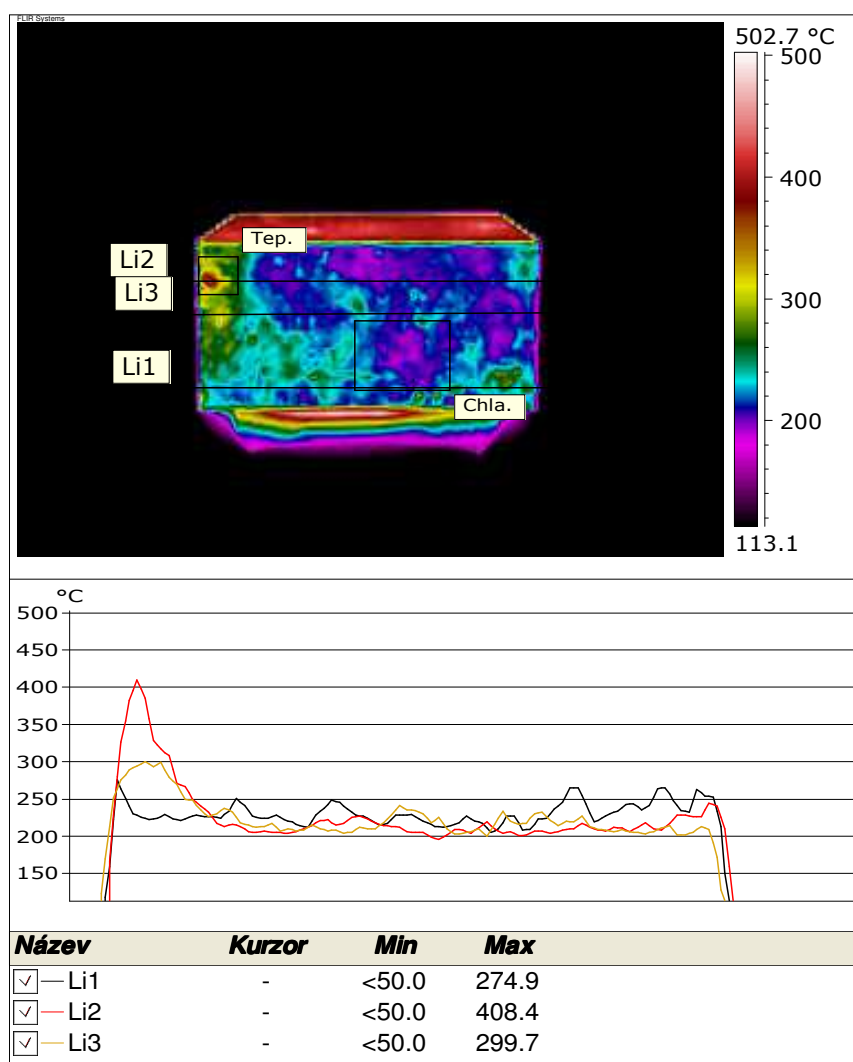
Na Obr. 35 je materiál ukázán vlevo dole. Jako slitina hliníku má velice malou emisivitu a jeho bezkontaktní měření je složitější než u jiných případů. Projevuje se velký vliv odražené teploty, působí jako zrcadlo pro infračervenou oblast. Na snímku Obr. 41 jsou vidět znatelné oblasti oxidu, které mají rapidně větší emisivitu a dochází k velké nerovnoměrnosti zobrazené teploty. Snímek také dokazuje, že emisivita ve směru blížícím se  $90^\circ$  od normály povrchu je znatelně vyšší než normálová emisivita povrchu, který je snímán a analyzován.

Na Obr. 40 jsou vidět průběhy teploty a její histogram. Při měření byla emisivita špatně zvolena, a proto hodnoty teploty nevypovídají skutečnosti. Později provedeme optimalizace této plochy pomocí předchozích procedur.



Obr. 40 Průběh teploty a histogram pro vybranou normálovou plochu





Obr. 41 Termogram a graf celého duralu

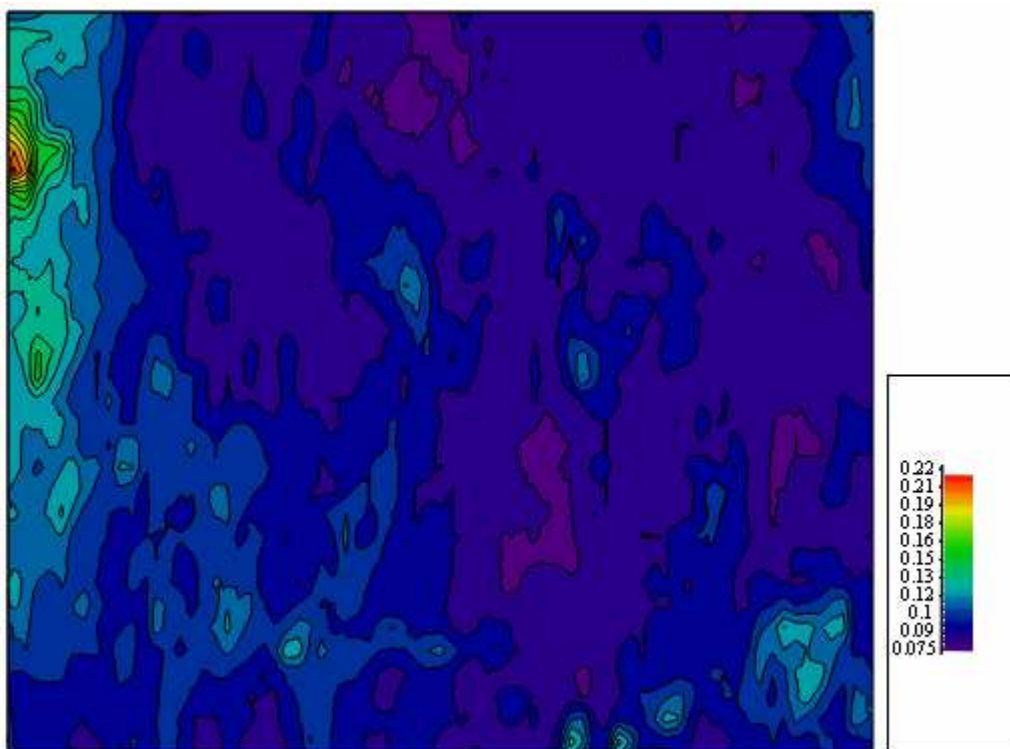
Nyní si ukažme jaké jsou změny teploty na povrchu materiálu a jak se mění emisivita. Součástí předešlého obrázku jsou tři průběhy teploty podle linií Li1, Li2 a Li3, které jsou vyznačeny na termogramu. Zvlnění pak ukazuje nerovnoměrnost teploty. Enormní je průběh dle Li2 a její počáteční část, kde rozdíl teplot na ploše kovu je až 200 °C.

Tab. 5 Nastavené údaje pro materiál dural

Parametry objektu	Hodnota
Emisivita	0.25
Vzdálenost objektu	0.4 m
Odražená teplota	20.0 °C
Teplota atmosféry	25.0 °C
Podrobnosti	Hodnota
Li1: Max	274.9 °C
Li2: Max	408.4 °C
Li3: Max	299.7 °C
Tep.: Max	418.1 °C
Tep.: Průměr	297.3 °C
Chla.: Max	271.5 °C
Chla.: Průměr	211.8 °C

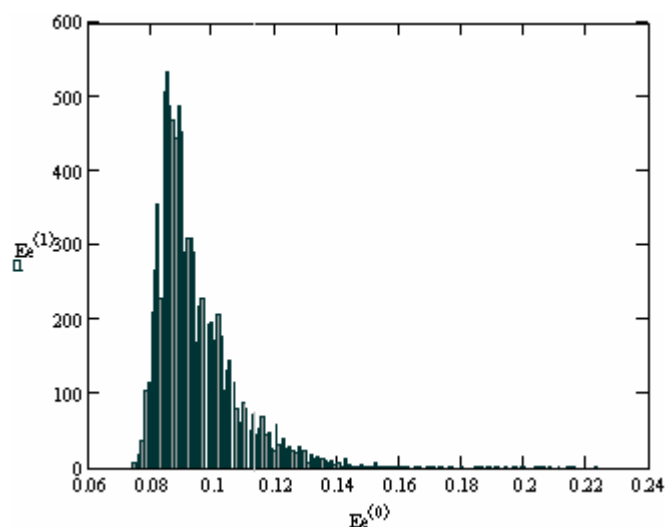
Rozdílnost emisivity tohoto povrchu je velmi značná, což je vidět ze zabarvení povrchu Obr. 41. Nastavené hodnotě se blíží jen prostor, který je obsažen v rámečku s nápisem Tep. hodnoty nastavené a naměřené při tomto nastavení ukazuje Tab. 5.

Podívejme se teď, jak bude vypadat průběh emisivity na této vybrané ploše, pokud budeme uvažovat, že plocha má konstantní teplotu na hodnotě 470°C. Použijeme již zmiňované procedury a výsledek po vyhodnocení je na následujícím obrázku Obr. 42.



Obr. 42 Korektní rozložení emisivity na vybrané ploše

Z daného obrázku je sestaven následující histogram Obr. 43, který ukazuje, že oproti nastavené hodnotě je skutečná hodnota posunuta znatelně níže. Průměrná hodnota je 0,094.



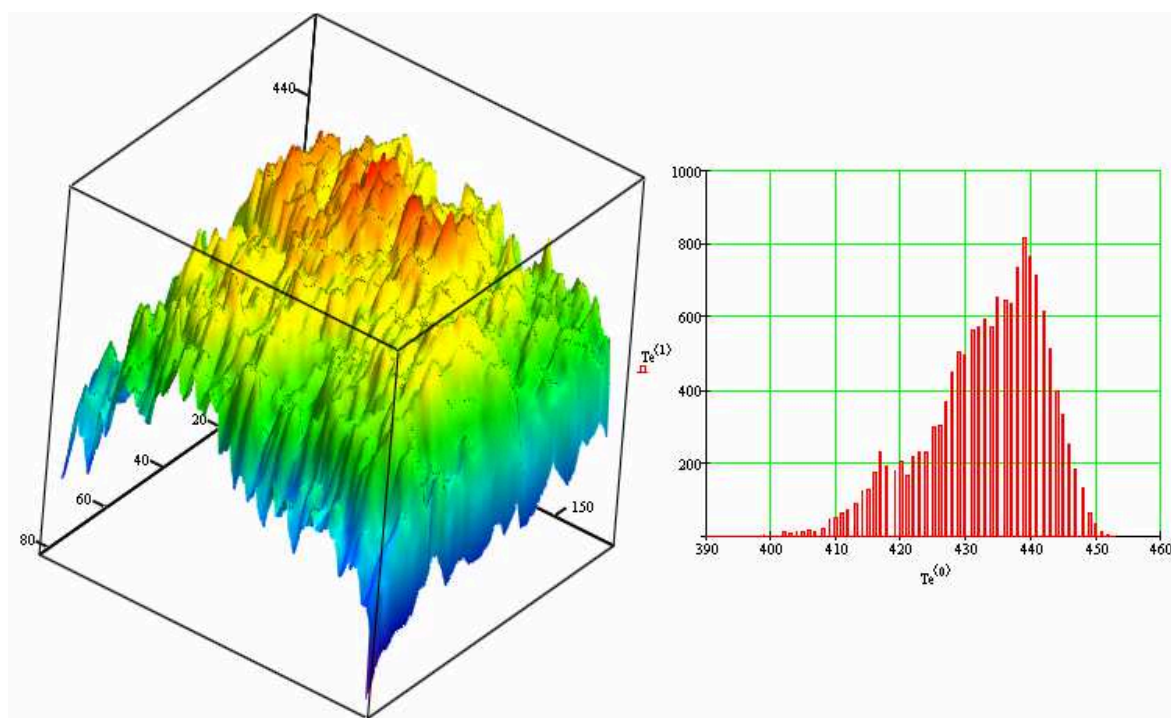
Obr. 43 Histogram emisivity při optimalizaci na 470°C



Maximální hodnota je 0,22 a minimální hodnota je 0,074. Z dat je pak dále určen rozptyl, ten má hodnotu  $1,78 \cdot 10^{-4}$ , medián o hodnotě 0,090 a modus o hodnotě 0,085. Dále je vypočtena špičatost, která má hodnotu 10,82 a šikmost o velikosti 2,39. Maximální rozdíl emisivity dvou sousedních bodů je stanoven na 0,048. Z předešlých hodnot vyplývá, že rozdíl mezi zoxidovanou částí a částí s mírnou oxidací má hodnotu 0,146. Tento rozdíl je však poněkud značný, protože u nízkých hodnot emisivity je změna teploty se změnou emisivity docela značná, jak je vidět na Obr. 36, když se vrátíte do kapitoly 4.1. Můžeme tedy říci, že měření hliníku a jejich slitin je velice obtížné, protože lze jen velice těžko určit, které místo je vztažné, a která místa znehodnocují celkový termogram při zvoleném nastavení kamery. Výsledné teploty se totiž tak liší, že je povinností použít referenční nátěr nebo nálepku, která má normovanou emisivitu větší než 0,9 (většinou 0,95), abychom dostali přesná data. Z tohoto experimentu vyplývá nepoužitelnost bezkontaktní metody měření bez použití dalších prostředků.

### 4.1.3 ŽELEZO

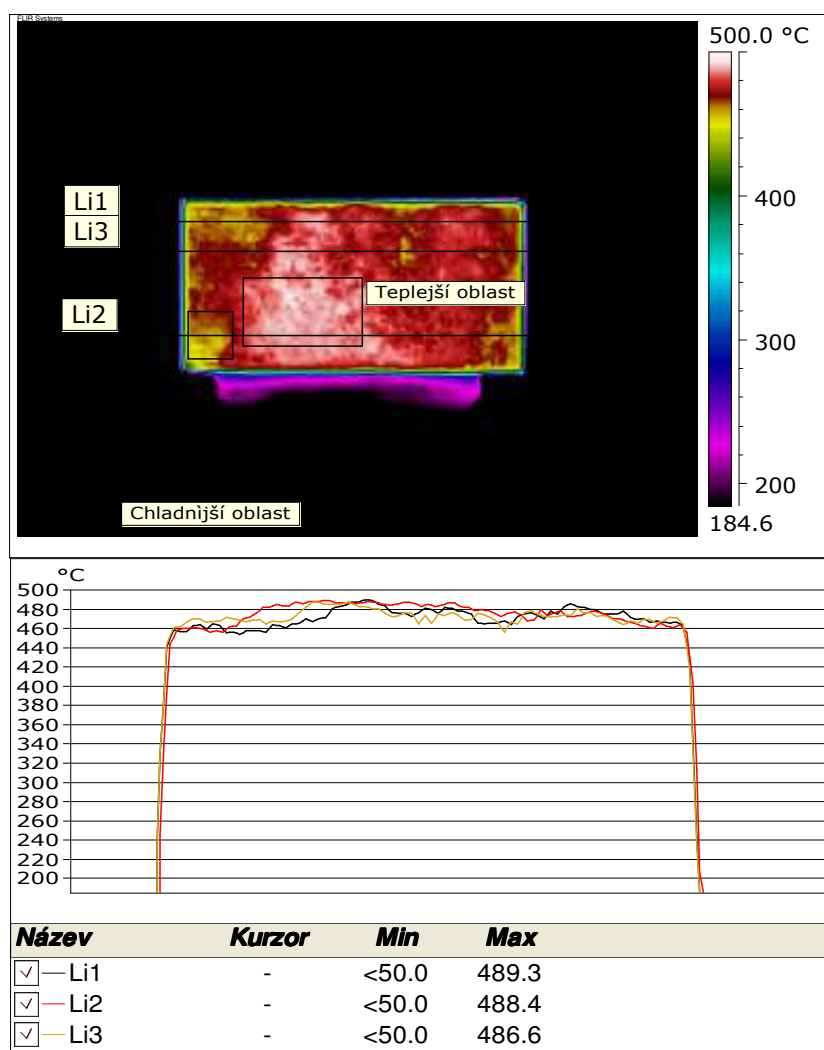
Železo jako konstrukční prvek, který se spíše používá ve formě oceli jako materiál pro nosné konstrukce proudovodných systému, je dalším prvkem, na který se zaměříme při rozboru. Tento kov a jeho další formy má horší tepelnou vodivost než hliník a měď, ale o to lépe září. Jeho standartní emisivita, se v neleštěném provedení, pohybuje kolem 0,7. Rozložení teploty pro výběr je vidět na následujícím obrázku Obr. 44.



Obr. 44 Rozložení teploty a histogram výběru teploty

Jelikož má železo vyšší emisivitu, tak její změna má menší vliv na vyhodnocenou teplotu. Z následujícího termogramu můžeme vidět, že rozložení teploty je mnohem homogennější než v předchozím případě. V praktickém případě je většinou železo či ocel opatřena ochranným nátěrem, protože velice snadno oxiduje a vrstvy oxidu jsou poměrně masivní. Při dlouhodobém působení okolního prostředí pak může docházet až k porušení mechanických vlastností kovů. Výhodou povrchové úpravy kovů nátěrem je, že zvyšuje emisivitu a u většiny

nátěru se dostáváme na hodnoty nad 0,85.



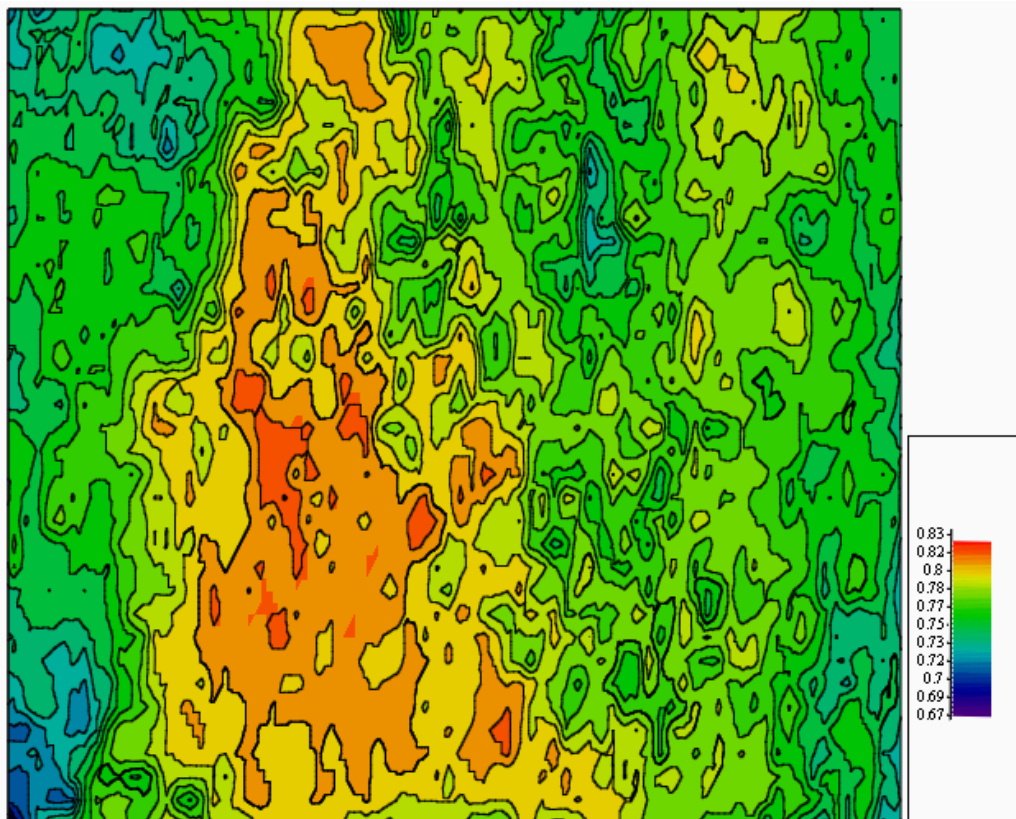
Obr. 45 Termogram a graf železa

Následující tabulka ukazuje nastavené údaje pro měření jehož výsledky jsou na Obr. 45.

Tab. 6 Nastavené údaje pro materiál železo

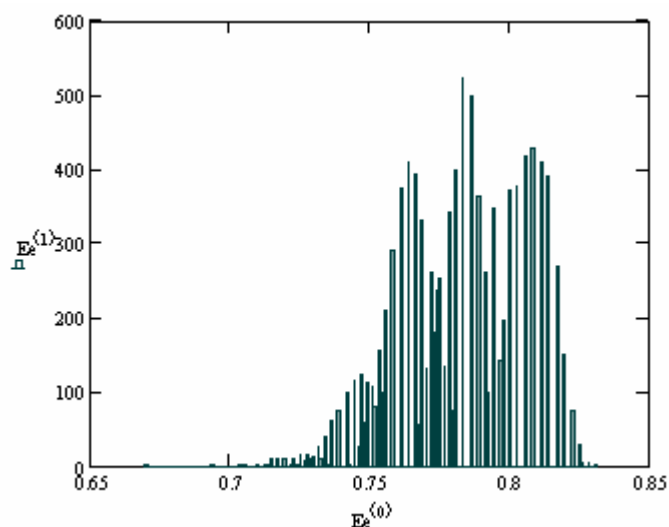
Parametry objektu	Hodnota
Emisivita	0.74
Vzdálenost objektu	0.4 m
Odražená teplota	20.0 °C
Teplota atmosféry	25.0 °C
Podrobnosti	Hodnota
IR: Max	493.1 °C
IR: Min	<50.0 °C
Li1: Max	489.3 °C
Li2: Max	492.4 °C
Teplejší oblast: Max	493.1 °C
Teplejší oblast: Min	470.8 °C
Chladnější oblast: Max	476.6 °C
Chladnější oblast: Min	441.3 °C

Z Obr. 45 můžeme vidět, že nastavená hodnota emisivity by mohla v určitých částech objektu vyhovovat. Ostatní části jsou nadhodnoceny a podhodnoceny. Z průběhu teplot podél linií Li1 až L13 můžeme vidět, že nejmarkantnější rozdíl teplot je vidět na Li1. Zde tento rozdíl dosahuje až cca 30°C. Výsledné rozložení pak bude vidět po použití optimalizace. Výsledek optimalizace na 470°C je vidět na Obr. 46.



Obr. 46 Rozložení emisivity pro železo

Z vyhodnocení vyplývá, že vlivem oxidace je rozsah emisivit od 0,72 do 0,82. Na obrázku je vidět, že emisivita v dolním rohu je ještě o něco menší, ale její výskyt je minimální, a proto je dolní mez uvažována na 0,7. Z rozboru vychází následující histogram emisivity.

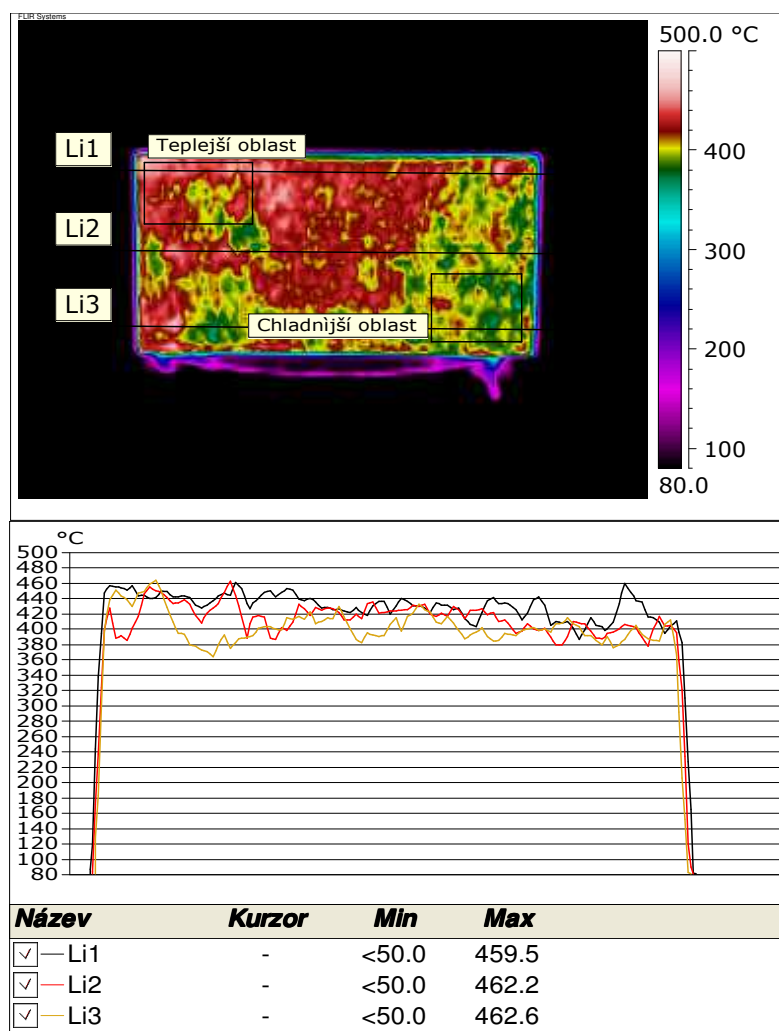


Obr. 47 Histogram emisivity

Maximální rozdíl emisivity ve dvou sousedních bodech je 0,035. Průměrná hodnota je 0,782, modus 0,784 a medián 0,781. Dále špičatost je -0,532, šikmost je -0,207 a rozptyl je  $4,93 \cdot 10^{-4}$ . Je vidět, že rozložení emisivity v rozsahu min až max je mnohem méně špičatější a vrcholy se v histogramu vyskytují 3, jejichž maximum je v hodnotách 0,76, 0,78 a 0,80. Jelikož je emisivita poměrně vysoká, je i změna teploty poměrně malá, a proto můžeme říci, že pokud zadáme hodnotu s rozdílem setin okolo hodnoty 0,77, pak výsledná teplota bude poměrně vypovídající.

#### 4.1.4 MĚĎ

Měď charakterizuje nejpoužívanější elektrovodný kov, který se používá ve většině vodičů. Vyskytuje se jak v leštěných, tak v matných podobách. Lesklá forma se naštěstí na vzduchu poměrně rychle potahuje oxidem a její emisivita stoupá až nad hodnotu 0,5, což pak více eliminuje velký vliv odrazů.



Obr. 48 Termogram měď

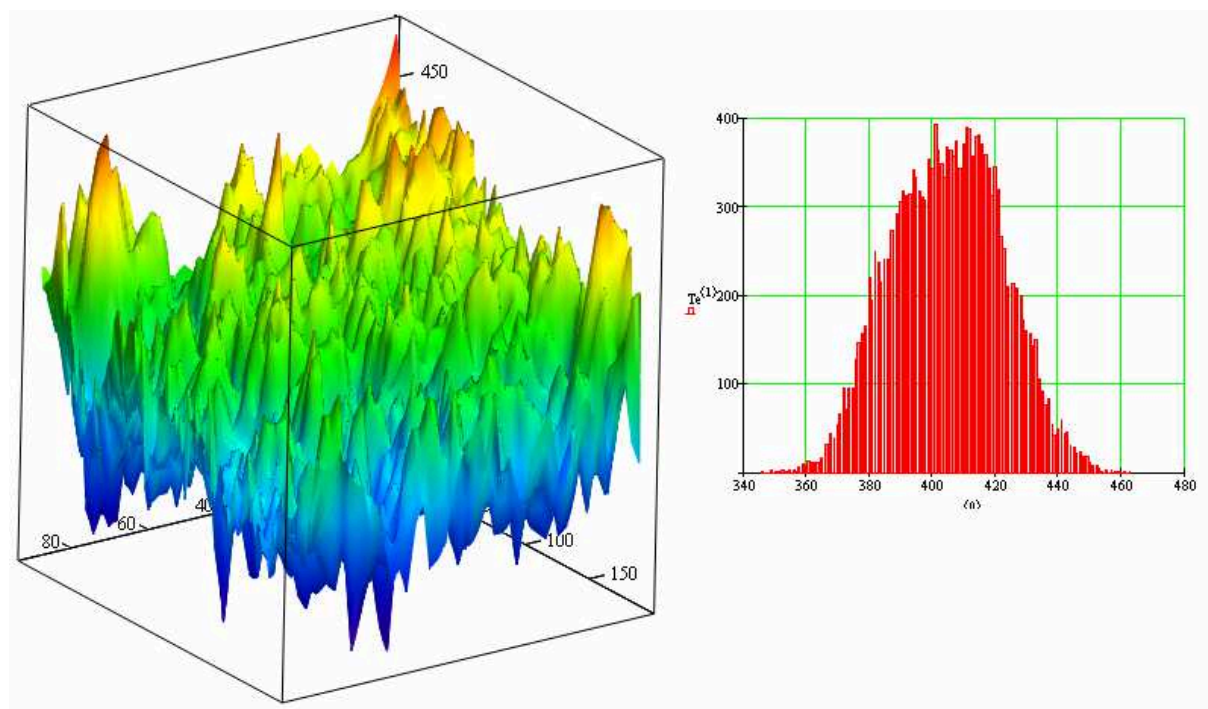
Hodnoty nastavené na kameře a hodnoty, které jsou z první jednoduché analýzy jsou ukázané v následující tabulce. Nejvyšší rozdíl v teplotách je na linii Li3, kde rozdíl teplot na povrchu materiálu dělá až 100°C. Je vidět, že homogenita povrchu je oxidem značně narušena. Vrstvy oxidu zvyšují emisivitu materiálu a jelikož je střední hodnota emisivity tohoto materiálu

mírně pod číslem 0,55, je rozdíl měřených teplot už značně vyšší. U tohoto kovu jsou podobné rozdíly teplot jako u hliníku, ale rozložení emisivity bude ve vyšších hodnotách. Jak je vidět z Tab. 7, je emisivita nastavena mírně nad skutečnou hodnotu.

Tab. 7 Parametry a jednoduchá analýza pro měď

Parametry objektu	Hodnota
Emisivita	0.55
Vzdálenost objektu	0.4 m
Odražená teplota	20.0 °C
Teplota atmosféry	25.0 °C
Podrobnosti	Hodnota
Li1: Max	448.9 °C
Li1: Min	<50.0 °C
Li2: Max	432.2 °C
Li2: Min	<50.0 °C
Li3: Max	443.2 °C
Li3: Min	<50.0 °C
Chladnější oblast: Max	434.1 °C
Chladnější oblast: Min	350.0 °C
Teplejší oblast: Max	470.0 °C
Teplejší oblast: Min	373.6 °C

Celkové rozložení teploty je vidět na následujícím obrázku. Histogram teploty má stejnou šířku jako u hliníku, ale není tak ostrý. V porovnání se železem je pak jeho šířka dvojnásobná a tvar je opět tupější než u jmenovaného kovu. Histogram nemá žádný jednoznačný vrchol, ale maxima se vyskytují v oblasti teplot od 400 do 425 °C.

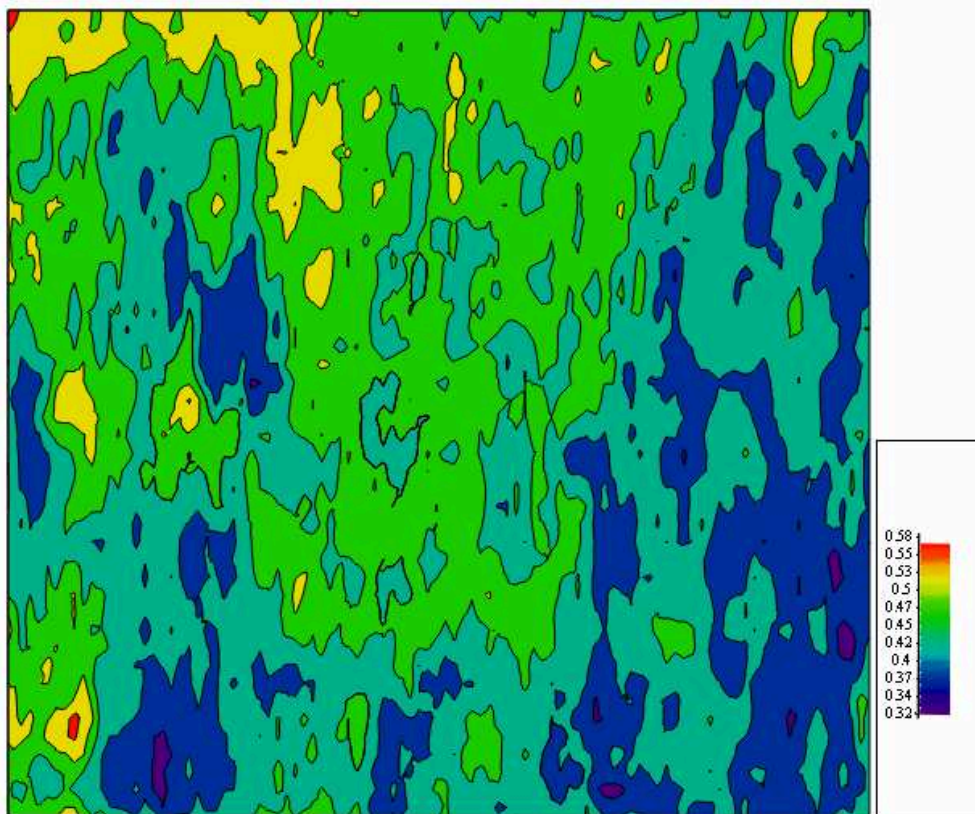


Obr. 49 Průběh teploty a histogram pro výběr na povrchu materiálů

Optimalizace nám ukázala následující průběh emisivity po měřené ploše kovu. Byla

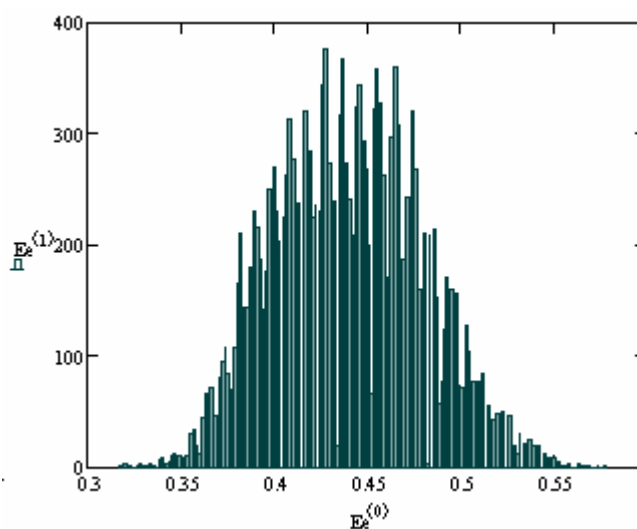


provedena pro standardní teplotu 470°C.



**Obr. 50 Rozložení emisivity pro měď**

Na Obr. 50 můžeme vidět, že na ploše se vyskytují jen dvě malá místa, kde emisivita je větší než 0,57. Obecně je pak rozsah emisivity mezi hodnotami 0,36 a 0,52. Pro celkovou představu o rozložení emisivity po ploše je vložen histogram jako následující obrázek Obr. 51.



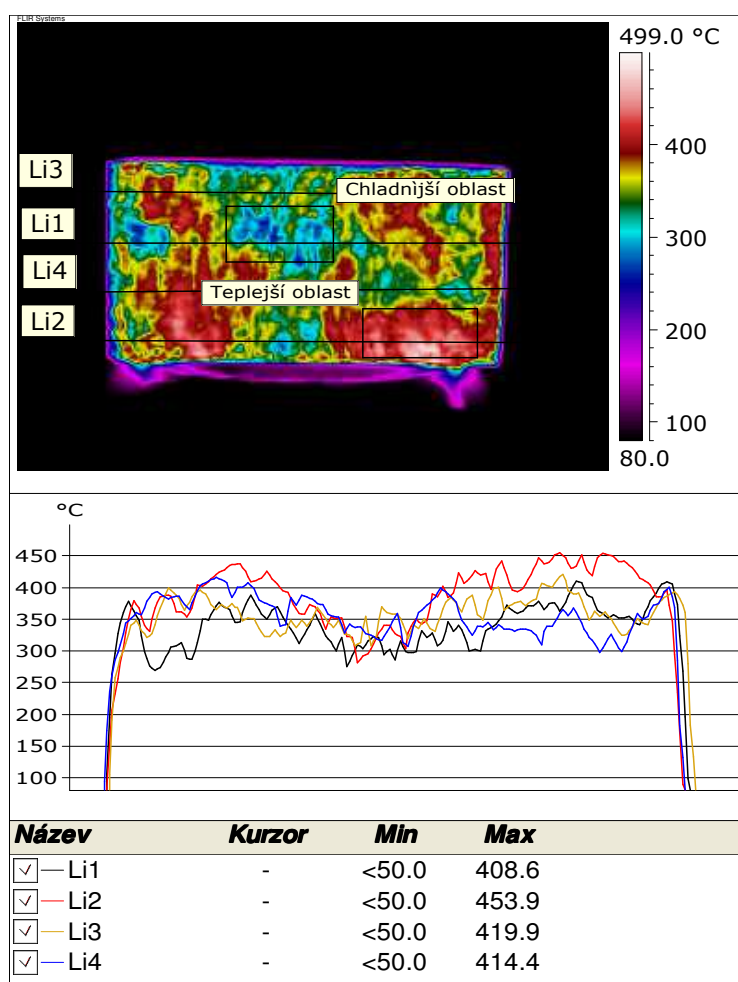
**Obr. 51 Histogram emisivity pro měď**

Z analýzy se pak ukazují další hodnoty pro šikmost, která vychází 0,119, pro špičatost, která vychází -0,450 a pro rozptyl, který je  $1,52 \cdot 10^{-3}$ . Modus vychází 0,428, medián 0,437 a průměr 0,438. Maximální rozdíl mezi dvěma sousedními body je 0,064. Rozsah hodnoty po analýze dle předcházejících měření je největší. V histogramu se projevuje, stejně jako u

teploty, nejednotnost globálního maxima a vyskytuje se více vrcholů. Histogram také oproti předchozím hodnotám vykazuje větší rozptýlení hodnot. Pro měření je vidět, že nastavená emisivita se musí volit dle oxidace povrchu, aby byly změřené hodnoty vypovídající. Pro volbu emisivity pak nejtmavší plochy (černé zoxidované) odpovídají emisivitě 0,5 a nejsvětlejší (podobné čisté mědi) 0,36.

#### 4.1.5 MOSAZ

Tento kov je v elektrotechnice používán trochu méně než předchozí, ale i přesto byl tento kov zvolen k rozboru. Jde ve svém základním provedení o slitinu mědi a zinku, další modifikace pak představují slitinu mědi, zinku s jinými kovy, kde je nahrazena část podílu zinku. Tato slitina se ve svém chování v IR oblasti velice podobá mědi. Jako první je uveden termogram z měření mosazi po zahřátí.



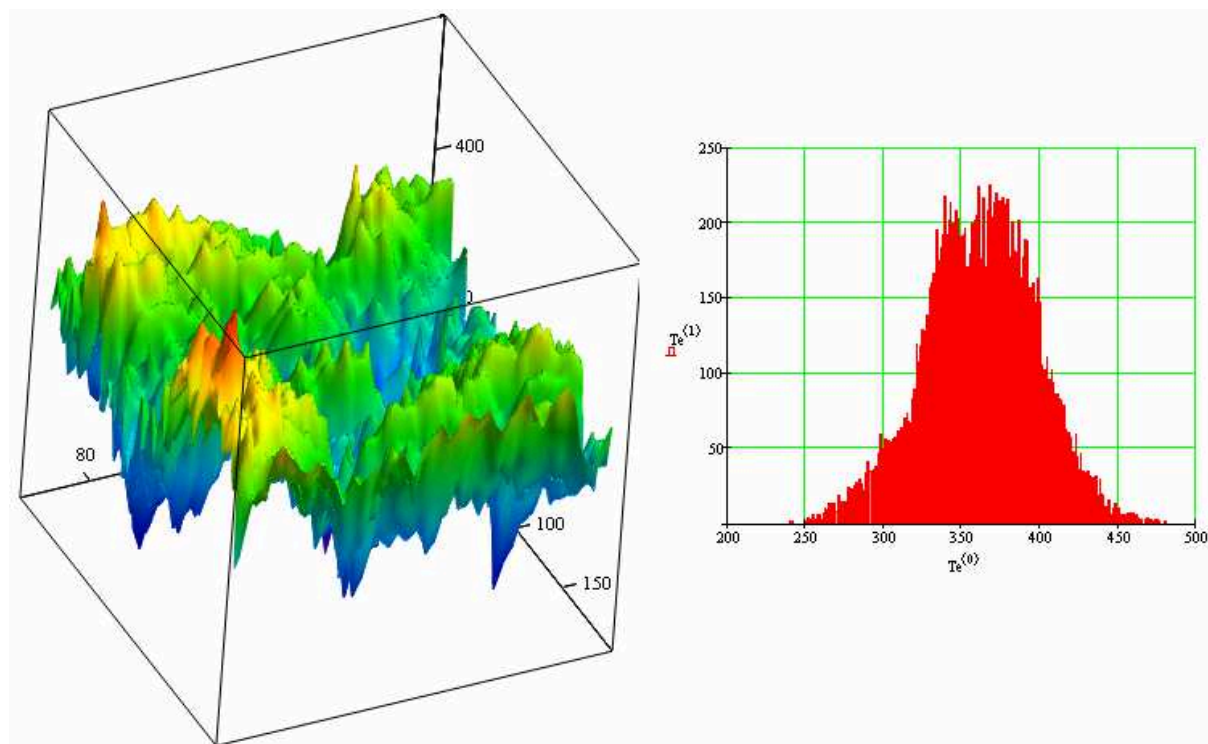
Obr. 52 Termogram a linie pro mosaz

Jako u mědi, tak i u mosazi je nehomogennost teploty značná, protože střední emisivita tohoto materiálu se pohybuje pod hodnotou 0,5, což můžeme vidět na termogramu. Pokud analyzujeme jednotlivé linie, tak zjistíme, že majoritní skok je u Li2. Zde hodnota rozdílu teploty na ploše kovu je kolem 170°C, což spíše odpovídá hliníku než mědi. Pro představu o nastavení kamery ještě přidávám tabulku o nastavení a jednoduché analýze termogramu.

Tab. 8 Parametry a jednoduchá analýza pro mosaz

Parametry objektu	Hodnota
Emisivita	0.51
Vzdálenost objektu	0.4 m
Odražená teplota	20.0 °C
Teplota atmosféry	25.0 °C
Podrobnosti	Hodnota
IR: Max	482.8 °C
IR: Min	<50.0 °C
Li1: Max	408.6 °C
Li2: Max	453.9 °C
Li3: Max	419.9 °C
Li4: Max	414.4 °C
Teplejší oblast: Max	482.8 °C
Teplejší oblast: Min	328.3 °C
Chladnější oblast: Max	400.5 °C
Chladnější oblast: Min	239.4 °C

V předchozí tabulce můžete vidět rozdíly v jednotlivých částech plochy měřeného kovu. Pro celkovou představu o rozložení teploty na měřené ploše jsem vložil následující obrázek, který ukazuje histogram teploty plochy kovu, bez pozadí, a 3D zobrazení teploty na ploše.

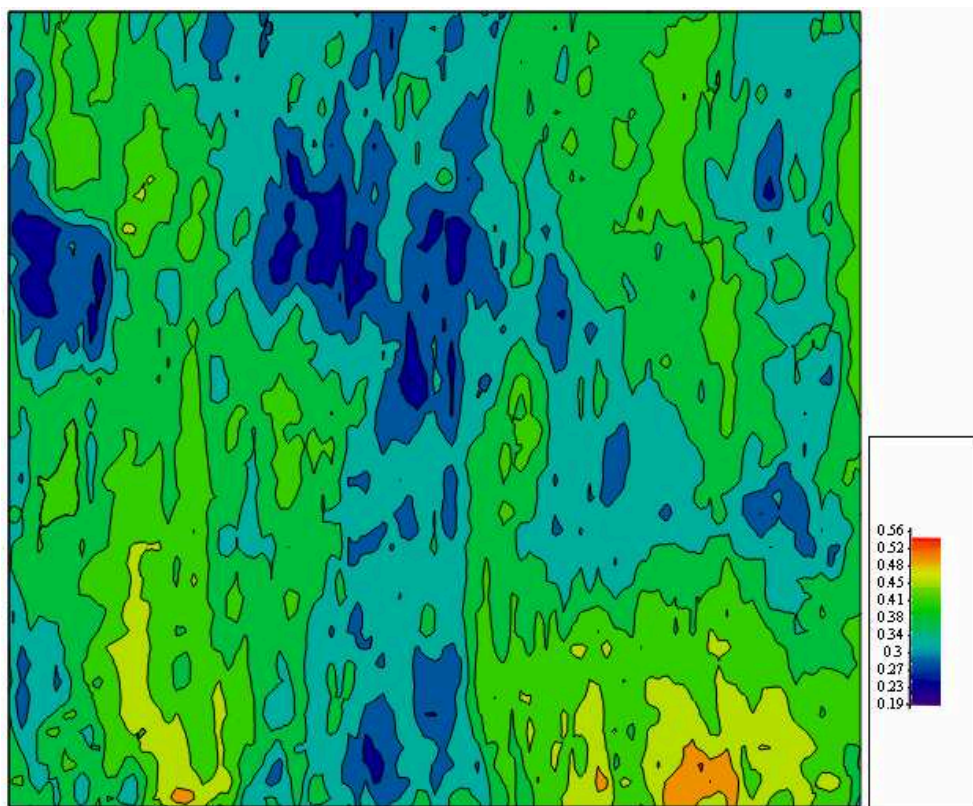


Obr. 53 Rozložení teploty pro měřenou plochu mosazi

Pokud budeme porovnávat, tak podoba histogramu teploty je velice podobná mědi, ale šířka tepelného spektra je širší pro mosaz. Jako u mědi se zde projevuje nejednoznačnost vrcholu vyzařování na určité teplotě a vrcholy se rozkládají od hodnoty 330 do 400°C. Můžeme vidět, že nastavená emisivita je nekorektní, protože do teploty 470°C zasahuje jen malá část

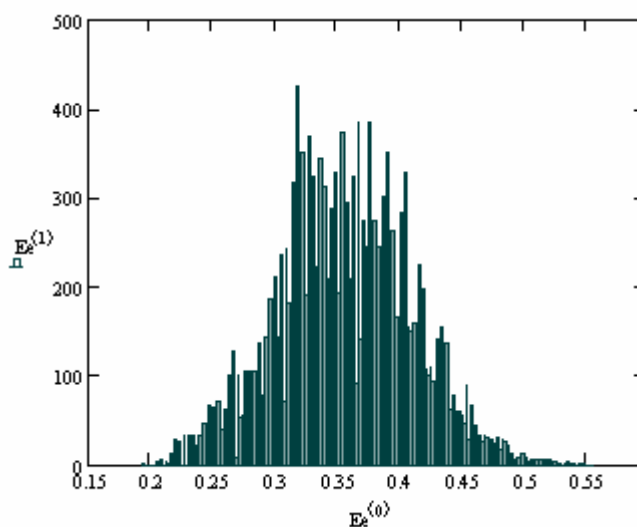


histogramu teploty. Korektní emisivita by měla být nižší, než byla nastavena při měření. Pokud použijeme optimalizaci emisivity na 470°C, tak dostává následující rozložení emisivity po snímané ploše.



**Obr. 54 Rozložení emisivity pro mosaz**

Z rozboru můžeme vidět, že rozsah emisivit na Obr. 54 je v rozmezí 0,2 až 0,5, pokud zanedbáme extrémní hodnoty nalezeného minima a maxima, které mají hodnotu 0,195 a 0,557. Pro celkovou představu je přidán histogram optimalizované emisivity Obr. 55.



**Obr. 55 Histogram emisivity pro mosaz**

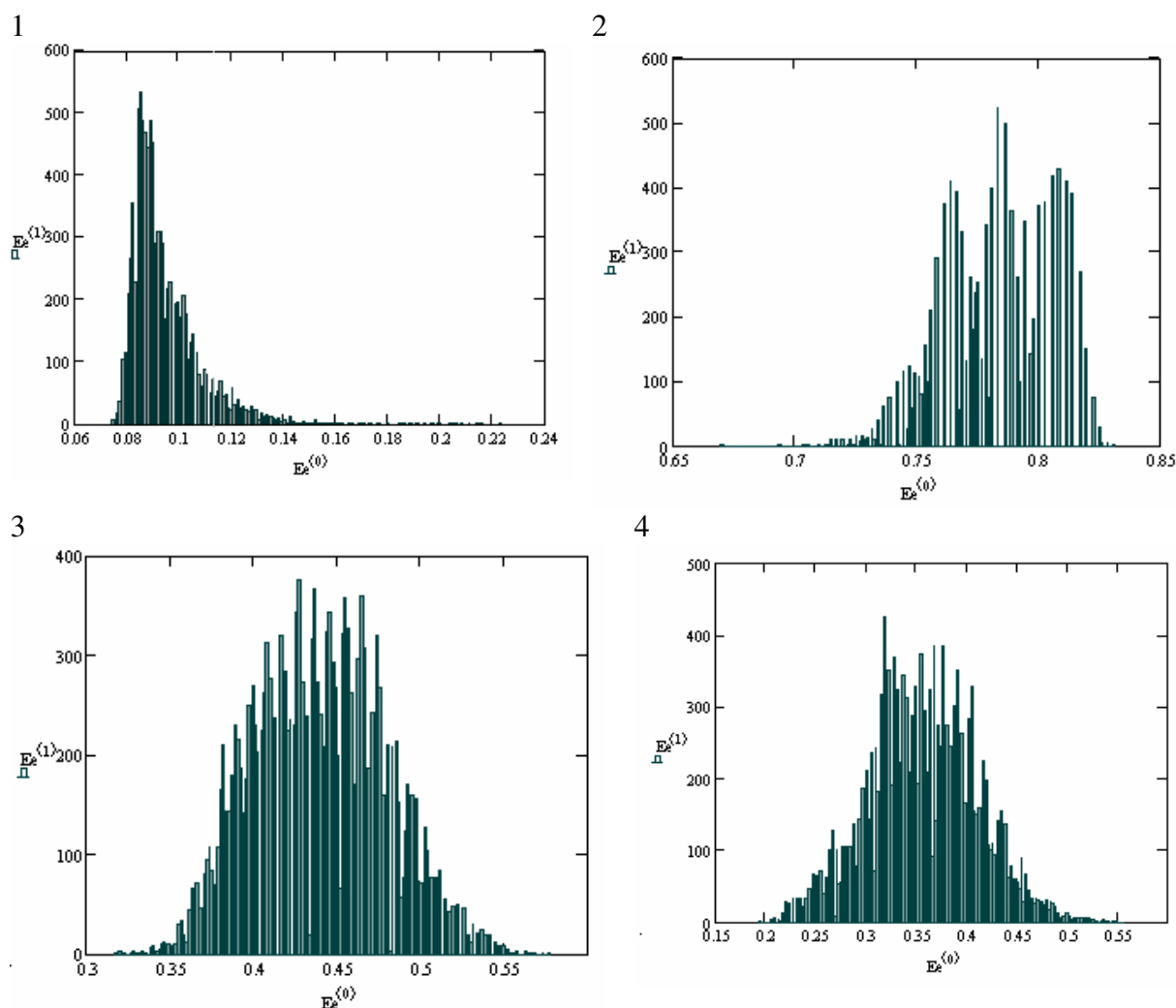
Při analýze získané emisivity můžeme říci, že ze všech hodnot má mosaz nevyšší nalezený

rozdíl mezi dvěma sousedními body a ten má hodnotu 0,070. Průměr pro dané měření je 0,360. Zjištěná šikmost je 0,071, špičatost je -0,095, modus je 0,368 a medián je 0,359. Rozptyl hodnot je také největší pro všechny vzorky a je vypočten na  $2,95 \cdot 10^{-3}$ . Pokud porovnáme mosaz a předchozí analýzy, pak můžeme říci, že spektrum emisivity je nejpodobnější mědi, ale má větší šířku, a proto můžeme říci následující konstatování. Pokud neznáme stupeň oxidace daného materiálu, pak může být měřená chyba v teplotě až skoro 200°C, což už je dost extrémní hodnota. Z ohledem na to, že měřené povrchy při běžné diagnostice mají mnohem menší teplotu než 470°C, pak můžeme říci, že při běžném měření je chyba znatelně menší. Chyba je v hodnotách cca 60°C, pokud je při nastavené emisivitě 0,5 je naměřená hodnota teploty 95°C, změnou o maximální rozsah emisivity na 0,2, pak teplota vzroste na 160°C.

#### 4.1.6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KOVŮ

Na závěr této podkapitoly jsou zde pro porovnání jednotlivé optimalizované údaje pro všechny čtyři kovy současně, aby bylo porovnání co nejjednodušší. První tabulka Tab. 9 obsahuje histogramy optimalizovaných emisivit a druhá tabulka Tab. 10 obsahuje vypočítané statistické údaje pro tyto histogramy (kovy).

**Tab. 9 Porovnání histogramů jednotlivých kovů (hliník 1, železo 2, měď 3, mosaz 4)**



Tab. 10 Vypočtené údaje

Kov	Dural	Železo	Měď	Mosaz
Max	0,2237	0,8313	0,5778	0,5575
Min	0,0748	0,67033	0,3173	0,1948
Rozsah*	0,07-0,12	0,72-0,82	0,36-0,52	0,24-0,45
Špičatost	10,8201	-0,5321	-0,4504	-0,0951
Šikmost	2,3940	-0,2068	0,1195	0,07178
Modus	0,0856	0,7836	0,4279	0,3686
Medián	0,0902	0,7809	0,4369	0,3593
Průměr	0,0944	0,7821	0,4378	0,3596
Max $\Delta e^{\dagger}$	0,0475	0,0353	0,0643	0,0702
Rozptyl	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$

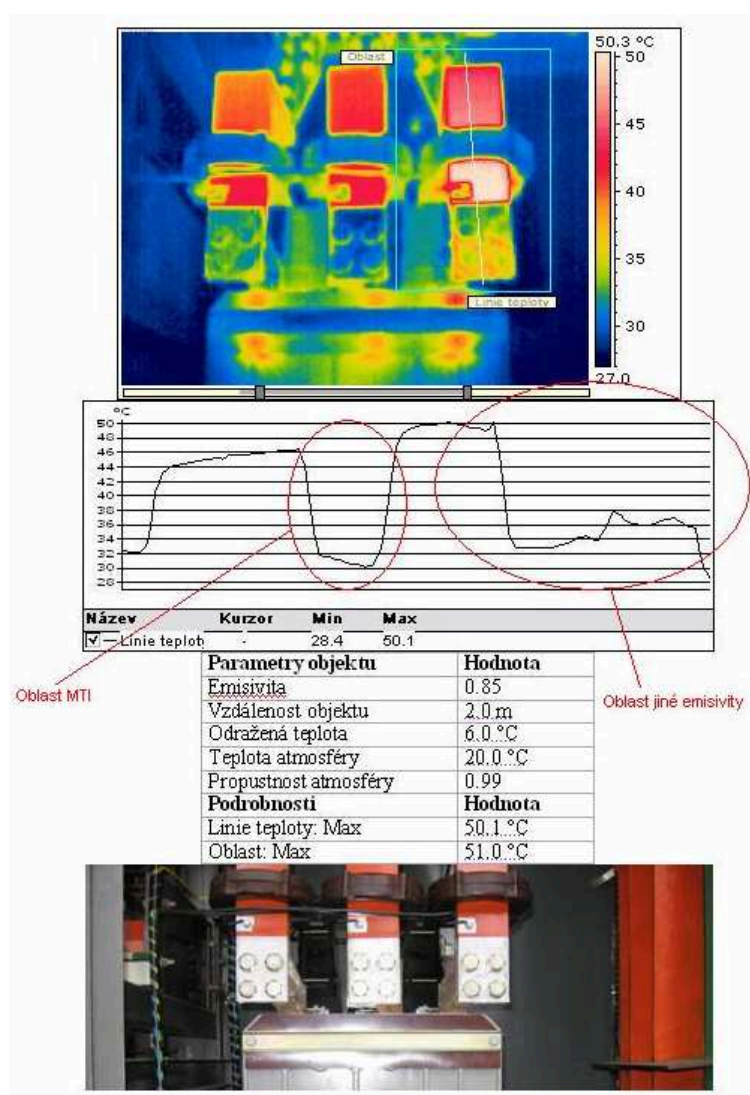
Z předcházejícího souhrnu můžeme vidět, jak ovlivňuje vrstva oxidu emisivitu daného materiálu. Toto měření může sloužit jako vzor pro nastavení kamery při měření. Je otázkou jestli kameru nastavovat na hodnotu modusu, jako nejčastěji se vyskytující hodnoty, nebo dle průměru. Naštěstí u všech výběrů nám hodnoty vychází velice podobné a tak je na nás, jakou zvolíme hodnotu. V případě hliníku, mědi a mosazi bych určitě doporučil referenční štítek, či barvu, pro dostatečnou přesnost měření. Tento rozbor má prakticky ukázat, jaké můžou nastat chyby při měření určitých kovů a zvláště těch, které mají emisivitu nižší než 0,5.

\* Je určována pro škály s větším počtem než 50 výskytů

<sup>†</sup> Maximální rozdíl dvou sousedních hodnot nalezený ve výběru

## 4.2 MATERIÁLOVÁ SLOŽITOST KONTROLOVANÝCH OBJEKTŮ

Pokud se vyrovnáme s předchozími problémy, pak můžeme uvažovat o dalších. Další uvažovanou problematikou bezkontaktních měření tepelných polí je nesterorodost materiálů ve snímané oblasti kamer. Kamera podporuje jedinou nastavenou hodnotu emisivity a je předpoklad, že správně naměřené hodnoty teplot budou jen na plochách, které mají zadanou hodnotu parametru stejnou. Na ostatních plochách termozobrazovač indikuje falešnou teplotu, která je buď vyšší než skutečná nebo nižší než skutečná. Tyto údaje pak vedou k tomu, že použitelná je vždy jen část termogramu. Tento aspekt se dá částečně odstranit pozdějším zpracováním v programu pro postprocessing. Ukázku, kde vidíme, jak se projevuje nesterorodost emisivity povrchu proudovodné dráhy na výsledném průběhu teploty, můžeme vidět na Obr. 56.



Obr. 56 Ukázka průběhu teploty podél naměřené linie

Pro ucelení pohledu můžeme říct, že na obrázku je vidět systém přípojníc, které tvoří holé hliníkové ploché vodiče, jejichž povrch je částečně natřen barvou. Barva není v oblasti šroubového spoje, kde jsou vodiče připojené na jistič. Část dráhy vodiče nám zakrývají měřicí transformátory proudu. Výsledný průběh teploty podél naznačené linie můžeme vidět na

připojeném grafu. Pokud bychom teplotu měřili kontaktní metodou a pokud bereme v úvahu fyzikální principy, musíme říci, že teplota podél naznačené linie musí být spojitá. Zanedbáním plochy měřicího transformátoru, pak můžeme vidět, že chyba indikace teploty stejnorodým nastavením emisivity je dosti značná. Pro představu je přiložen i snímek ve viditelném spektru. Navážeme-li na předchozí problém, můžeme připojit i další a to změnu indikované teploty při změně pozorovacího úhlu od kolmice k měřené ploše. Tato změna je způsobena změnou emisivity se změnou úhlu. Některé materiály mají tuto změnu s úhlem větší a některé touto vlastností trpí méně.

Při uvažování naznačeného problému na předchozím obrázku, můžeme definovat kam by se měla termodiagnostika v budoucnu posunout. Vhodně by se tento problém dal vyřešit dalším systémem na termokameře, který by zjišťoval emisivitu měřeného materiálu a nastavoval na jednotlivých plochách. Tento systém určitě nebude jednoduchý a je předpoklad, že zvedne cenu termozobrazovače, ale měření bude daleko přesnější. Řešení bych viděl v ozařování plochy zářičem o určité vlnové délce a snímání jeho odrazu od daných materiálů. S uvažováním jednotlivých vlivů např. pohltivosti, útlumu atmosféry, úhlu od normály povrchu atd. by se pak dala hodnota poměrně přesně určit. Musel by však být brán ohled na změny emisivity vlivem měření různých vlnových délek.

## 5 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH PROTOKOLŮ

Aplikováním termodiagnostiky v praxi získáváme mnoho protokolů, které jsou bohatým zdrojem informací. Tyto informace mohou posloužit k více účelům. Jejich primární úkol je sloužit jako podklad pro údržbu a opravy. Sekundárních využití může být více a je jen na nás jak získaná data dále použijeme.

Z měřených protokolů se může vytvořit databáze, ve které soustředíme informace z protokolů a dále je můžeme statisticky zpracovávat. Pokud databáze obsahuje výsledky dlouhodobých měření, získáme užitečné výsledky, které mohou vypovídat o spolehlivosti typů zařízení nebo jejich částí. Celkové výsledky mohou ukazovat na nejproblémovější zařízení a nejproblémovější prvky. Dle těchto informací pak můžeme upravit plán kontrol a údržby, dle kterého musíme nejvíce hlídat zařízení s největším počtem závad.

### 5.1 OBECNÉ INFORMACE O DATABÁZI

Dlouhodobou spoluprací se nám podařilo získat velkou databázi termovizních měření, kde jako základní datový výstup slouží protokol. Jeho příklad již byl zobrazen v předchozí části. Protokol obsahuje všechna důležitá data, která byla naměřena, dále podmínky měření a doplňující informace. Součástí protokolů je i jednoduché zhodnocení aktuálního stavu zařízení, které se hodnotí dle oteplení měřených částí zařízení. Vyhodnocené oteplení již bylo definováno v předchozí části 3.3. Měření probíhalo v letech 2002 – 2009 na rozsáhlé distribuční síti, která obsahuje mnoho zařízení. Celou databázi pak můžeme rozdělit do několika skupin, které reprezentují jednotlivé systémy v energetické distribuční síti. Základní skupiny jsou:

- Rozvodny
- Distribuční trafostanice
- Vedení (nadzemní)

Tyto skupiny se dále mohou dělit na podskupiny dle napětí, provedení, složitosti, polohy, dle územních celků a další skupiny. Toto rozdělení je závislé na požadovaných informacích. My informace porovnáváme mezi sebou dále s teoretickými předpoklady.

Databáze obsahuje cca 10 000 protokolů, které obsahují i několik zjištěných závad v jednom protokolu. Vzhledem k takovému množství je jejich zpracování složité a časově náročné. Další obtíže tvoří nejednotné označování zařízení a jejich částí, což vede ke složitějšímu sjednocování a třídění. Po celkových úpravách může dojít ke statistickému zpracování a dalšímu využití výsledků, kterému se budeme věnovat v dalších kapitolách.

Zpracování bylo provedeno za pomoci programu MS Excel, kde byly vytvořeny databázové tabulky, které obsahovaly protříděné a seskupené informace. Další úpravy proběhly s použitím kontingenčních tabulek.

### 5.2 ÚPRAVA DATABÁZÍ

Dalším krokem zpracování je archivace. Je to jednoduchý úkol. Protokoly mohou být uloženy ve dvou formách, forma první je v tištěné podobě (nevýhodná) a druhá forma je v digitální podobě (je vhodnější formou pro statistickou analýzu). Nejlepší formou je kombinace první a druhé. Pro archivaci můžeme použít jednoduché programy jako MS Excel nebo MS Access, nebo složitě sofistikovanější jako MySQL. Po přeměně protokolů v digitální záznamy můžeme provést statistické analýzy. V našem případě máme velkou databázi měření a rozhodli jsme se, že pro zpracování použijeme program MS Excel, protože jeho funkce máme

více osvojeny.

### Popis databáze:

- Přibližně bylo zaznamenáno 16.000 problémových položek.
- Dosavadní záznamy jsou nestejnorodé, liší se forma a obsah zápisu.
- Záznamy z měření v rozvodnách, elektrických vedení (VN, VVN), DTS, rozvaděčů (nn).
- Nejednotnost označování zařízení a jejich součástí.
- Některá měření už se periodicky opakovala, některé zařízení bylo kontrolováno poprvé.

Tato databáze je rozsáhlá pro snadné zpracování a k obtížnosti se přidávají problémy výše jmenované. Největším problémem je nehomogenita protokolů a různé zpracování záznamu v základních databázích. Jako základní databázi bereme netříděné a neupravené databáze se surovými daty. Způsob tvorby databáze byl měněn během let. Nejstarší záznamy zahrnující nejvíce informací a mladší záznam zahrnující méně. Můžeme vidět rozdíly v Obr. 57. Tento obrázek zobrazuje dva typy základních databází, které musíme sjednotit. Některé údaje se musí vypustit, protože jsou jedinečné, nejde je přiřadit k některé skupině nebo jde o špatnou interpretaci. Je škoda, že záznamy se liší v několika letech. Když jsme vyrobili hlavní databázi, musíme zařídit, aby všechny roky měly stejnou formu a v některých případech musíme eliminovat neúplné záznamy. Je docela obtížné sjednotit názvosloví, protože v některých případech je použito slangových názvů nebo různých označení pro stejný objekt. Pro toto zpracování byly použity třídící datové filtry softwaru MS Excel.

Year	Date	Persor	Protoco	Figure	Ordinal	District	Number od D
2002	2.1.		0201021				
2002	2.1.		0201022	C0102-01	1		
2002	2.1.		0201023				
2002	2.1.		0201024				

Name of DTS	Voltage	Fiel	Devices	Elemen	Phase	Degre
Krapkova			Bez závad			
Polská	0,4	RNN	Připojnice	Připojnice	PEN	3
Varšavské nám.			Bez závad			

District	Town/village	Voltage	Number of DTS	Name of DTS
Olomouc		22/0,4		
Olomouc		22/0,4		
Olomouc		22/0,4		

Kind of DTS	Problems HV	Problem LV	Date	Person
Kiosek	0	0	3.1.2005	
Kiosek	0	2	3.1.2005	
Kiosek	0	0	3.1.2005	

Obr. 57 Základní databáze pro rok 2002 a 2005 u DTS\*

Po celkových úpravách, kdy se dosáhlo jednotnosti a rozdělení do hlavních skupin, dochází k použití kontingenčních tabulek dříve jmenovaného programu a zpracováváme údaje dle požadovaných výstupů. Hlavní orientace úprav se mění dle skupiny. Nejzajímavější jsou pro nás nejproblémovější zařízení a prvky. Dále jsme se např. u DTS zajímali o závadovost jednotlivých provedení, údaje pro jednotlivé napěťové hladiny v jednotlivých oblastech atd.

\* Některé položky musely být odstraněny na přání distribuční společnosti od, které byla získána databáze protokolů. V některých následujících obrázcích bude toto odstranění také použito.

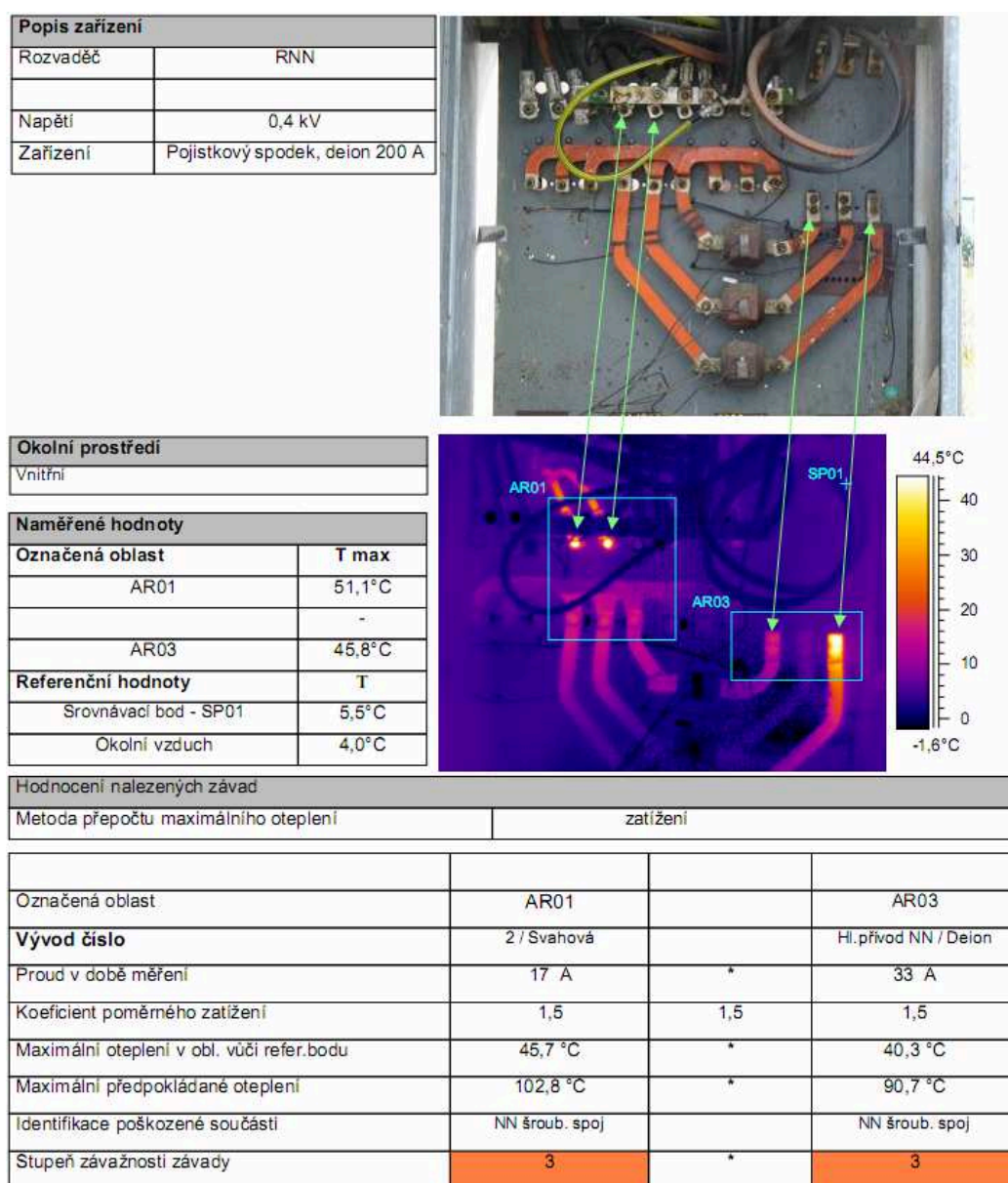


## 6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z upravených dat v databázích byly dle popsaných postupů vyhodnoceny některé údaje. Data jsme hodnotili podle námi zvolených parametrů a jednotlivé ukázky výsledků můžete vidět v následujících podkapitolách. V každé kapitole se zaměřujeme na hodnoty, které šly ze získaných dat vyčíst a na data, která vypovídají nejvíce u jednotlivých částí.

### 6.1 DISTRIBUČNÍ TRAFOSTANICE

Jako distribuční trafostanice bereme koncové transformátory, které slouží jako převodní prvek mezi vysokým napětím a nízkým napětím. Jsou většinou umístěny v místě spotřeby. Praktická ukázka části protokolu z měření na stožárové DTS je na vloženém obrázku (číslo).



Obr. 58 Část z protokolu z měření na DTS stožárového typu



Jejich složení se liší, ale vždy obsahují transformátor s vn a nn stranou a také přístrojové vybavení. Obvykle se člení dle provedení na:

- Stožárové
- Věžové
- Kioskové
- Kompaktní
- Polozapuštěné
- Zapuštěné

Tato jednotlivá provedení se liší dle složitosti, výkonu, vlivu okolních podmínek, stáří atd. Je však pravidlem, že vn strana bývá dle počtu prvků jednodušší než nn stana. U nejjednodušších provedení jsou na vn straně zapojeny jen bleskojistky a pojistky. Za nejjednodušší provedení se berou transformátory s nejmenšími výkony, které mají minimum vývodů na nn straně. U nn strany je to složitější. Pro termovizi znamená komplikovanost množství spojů a kontaktů, které nám slouží pro propojení proudovodné cesty. Základní data byla rozdělena do dvou velkých lokálních oblastí, které odpovídají dvěma velkým územněsprávním celkům. Dále budeme označovat jako **oblast 1** a **oblast 2**. Ukázka upravené zjednodušené databáze pro DTS je ukázána na následujícím obrázku.

OSÚ	Obec	Číslo DTS	Název DTS	Provedení	Závady VN	Závady NN	Rok
	Hrubá Voda		ČSD	Stožárová	0	0	2004
	Hrubá Voda		Štěrk.	Stožárová	0	0	2004
	Hrubá Voda		Pila	Stožárová	0	0	2004
	Hrubá Voda		DD	Stožárová	0	0	2004
	Tršice		(Bez názvu)	Kiosková	0	0	2004

Obr. 59 Upravená databáze DTS

Dále byla zachována plná struktura pro rok 2002. Tato databáze má následující podobu, jak můžete vidět na obrázku na začátku další stránky. Tato podoba je nejdetailejší, která byla vypracována, ale pro její zdlouhavost se od ní upustilo. Databáze obsahuje i detailní informace k poloze nalezeného problému např. napětíovou hladinu, fázi, název obrazu pořízeného kamerou atd. Dle zaměření se pak využilo informací hlavně o provedení, prvku, zařízení a napětíové hladině.

Rok	Datum měř.	Měřil	Protokol	Obraz č.	Por. Č.	OSÚ	Čís.DTS	Název DTS	Napětí
2002	2.10.			C1002-15	1	Knov		Pionýrská	0,4
2002	2.10.			C1002-16	1	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-16	2	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-17	1	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-17	2	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-18	1	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-19	1	Knov		Květná 1	0,4
2002	2.10.			C1002-20	1	Knov		Máchova	0,4
2002	2.10.			C1002-20	2	Knov		Máchova	0,4
2002	2.10.			C1002-21	1	Knov		Máchova	0,4
2002	2.10.			C1002-22	1	Knov		Máchova	0,4

Pole,kobka	Směr	Zařízení	Prvek	Fáze	Stupeň
RNN 6		Pojistka	Svořka	L2	3
TR 1		Transformátor	Svorník NN	L3	3
TR 1		Transformátor	Svorník NN	L1	3
RNN 5		Pojistka	Svořka	L3	3
RNN 5		Pojistka	Svořka	L2	3
RNN 6		Pojistka	Svořka	L2	3
RNN 6		Pojistka	Svořka	L2	3
TR		Transformátor	Svorník.př.	L1	4
TR		Transformátor	Svorník.př.	L2	4
RNN 2		Pojistka	Svořka	L2	4
RNN 3		Deion	Svořka	L2	3

Obr. 60 Databáze DTS pro zpracování poruch prvků

Z databáze byly vyhodnoceny nejproblémovější prvky podle toho, kolik u nich bylo nalezeno jejich závad. Tyto prvky byly posuzovány z výsledků roku 2002, v tomto roce bylo zkontrolováno asi 4500 míst na části DTS. Celkové tyto oblasti mají přes 8000 trafostanic. Můžeme říci, že z cca 2500 nalezených závad bylo cca 100 na straně vn a zbytek na straně nn, což dělá asi jen 4% z celku. Rozdělení závad podle typu zařízení je uvedeno v Tab. 11. Zde se nerozlišuje napěťová hladina.

**Tab. 11 Závady zařízení za rok 2002**

Zařízení	Stupeň ohřátí			Vše
	2	3	4	
Pojistka	19	380	1025	1424
Transformátor	5	82	251	338
Jistič	4	54	232	290
Měřicí transformátor	3	27	132	162
Odpínač, odpojovač	0	11	131	142
Spojka	0	12	43	55
Other	3	61	102	166

Tab. 12 obsahuje počty nalezených závad pro jednotlivá provedení DTS za roky 2002 až 2009 ve vymezené oblasti 1, která obsahuje přes 3400 DTS. Prázdná pole označují, že dané provedení se v daném roce neměřilo.

**Tab. 12 Výsledné hodnoty dle provedení DTS pro oblast 1**

		Rok								
Provedení	Data	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Celkový součet
Kiosková	Průměr z Závady NN	3,78	1,64	4,03	3,46	3,63	2,54	2,00	1,95	3,02
	Maximum z Závady NN	30,00	22,00	48,00	27,00	23,00	21,00	18,00	15,00	48,00
	Průměr z Závady VN	0,10	0,06	0,05	0,10	0,07	0,03	0,01	0,04	0,07
	Maximum z Závady VN	5,00	4,00	2,00	6,00	4,00	2,00	1,00	1,00	6,00
	Součet z Závady NN	1596,00	445,00	508,00	833,00	552,00	481,00	238,00	107,00	4760,00
	Součet z Závady VN	41,00	17,00	6,00	25,00	10,00	5,00	1,00	2,00	107,00
	Počet měření	422,00	272,00	126,00	241,00	152,00	189,00	119,00	55,00	1576,00
Kompaktní	Průměr z Závady NN							0,23	0,18	0,21
	Maximum z Závady NN							3,00	2,00	3,00
	Průměr z Závady VN							0,00	0,00	0,00
	Maximum z Závady VN							0,00	0,00	0,00
	Součet z Závady NN							14,00	6,00	20,00
	Součet z Závady VN							0,00	0,00	0,00
	Počet měření							62,00	34,00	96,00
Stožárová	Průměr z Závady NN			0,92	1,13	1,27	0,90	1,03	0,87	1,01
	Maximum z Závady NN			9,00	17,00	10,00	12,00	14,00	14,00	17,00
	Průměr z Závady VN			0,04	0,12	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03
	Maximum z Závady VN			3,00	9,00	1,00	3,00	2,00	1,00	9,00
	Součet z Závady NN			351,00	431,00	388,00	415,00	750,00	294,00	2629,00
	Součet z Závady VN			14,00	47,00	3,00	9,00	10,00	1,00	84,00
	Počet měření			381,00	382,00	306,00	460,00	729,00	339,00	2597,00
Celkem Průměr z Závady NN		3,78	1,64	1,69	2,03	2,05	1,38	1,10	0,95	1,74

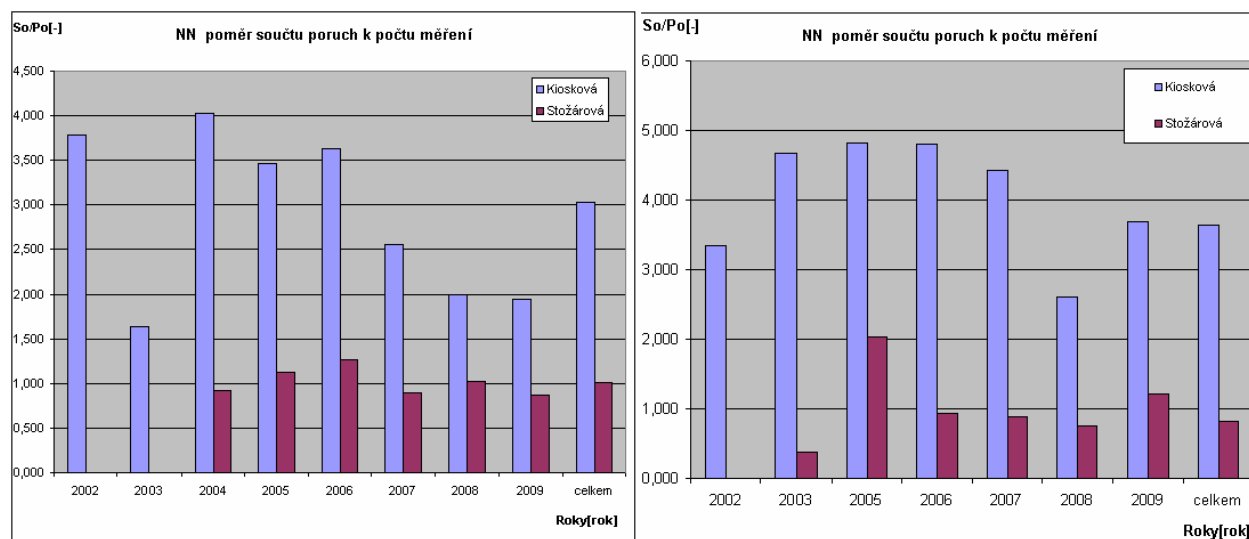
Celkem Maximum z Závady NN	30,00	22,00	48,00	27,00	23,00	21,00	18,00	15,00	48,00
Celkem Průměr z Závady VN	0,10	0,06	0,04	0,12	0,03	0,02	0,01	0,01	0,04
Celkem Maximum z Závady VN	5,00	4,00	3,00	9,00	4,00	3,00	2,00	1,00	9,00
Celkem Součet z Závady NN	1596,00	445,00	859,00	1264,00	940,00	896,00	1002,00	407,00	7409,00
Celkem Součet z Závady VN	41,00	17,00	20,00	72,00	13,00	14,00	11,00	3,00	191,00
Celkem Počet měření	422,00	272,00	507,00	623,00	458,00	649,00	910,00	428,00	4269,00

Pro oblast 2 jsou výsledky ukázány v následující tabulce Tab. 13. Zde jsou majoritní provedení kioskové a stožárové. Ostatní se vyskytují minoritně, a proto byla tato provedení vynechána. Forma tabulek je podobná, aby bylo jednotlivé provedení možno porovnávat.

**Tab. 13 Výsledná data pro jednotlivé provedení DTS pro oblast 2**

		Rok							
Provedení	Data	2002	2003	2005	2006	2007	2008	2009	Celkový součet
Kiosková	Průměr z Závady NN	3,33	4,67	4,81	4,80	4,41	2,61	3,68	3,63
	Maximum z Závady NN	23,00	26,00	20,00	22,00	29,00	22,00	21,00	29,00
	Průměr z Závady VN	0,19	0,12	0,06	0,08	0,08	0,10	0,04	0,11
	Maximum z Závady VN	7,00	4,00	1,00	5,00	5,00	5,00	4,00	7,00
	Součet z Závady NN	887,00	528,00	226,00	538,00	821,00	964,00	669,00	4633,00
	Součet z Závady VN	51,00	14,00	3,00	9,00	15,00	36,00	8,00	136,00
	Počet měření	266,00	113,00	47,00	112,00	186,00	364,00	182,00	1270,00
Stožárová	Průměr z Závady NN		0,39	2,04	0,93	0,88	0,76	1,22	0,82
	Maximum z Závady NN		11,00	13,00	8,00	10,00	13,00	13,00	13,00
	Průměr z Závady VN		0,03	0,33	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02
	Maximum z Závady VN		2,00	3,00	3,00	1,00	2,00	1,00	3,00
	Součet z Závady NN		155,00	49,00	71,00	90,00	671,00	567,00	1603,00
	Součet z Závady VN		13,00	8,00	4,00	2,00	15,00	6,00	48,00
	Počet měření		402,00	24,00	76,00	102,00	871,00	464,00	1939,00
Celkem Průměr z Závady NN		3,33	1,33	3,87	3,24	3,16	1,31	1,91	1,93
Celkem Maximum z Závady NN		23,00	26,00	20,00	22,00	29,00	22,00	21,00	29,00
Celkem Průměr z Závady VN		0,19	0,05	0,15	0,07	0,06	0,04	0,02	0,06
Celkem Maximum z Závady VN		7,00	4,00	3,00	5,00	5,00	5,00	4,00	7,00
Celkem Součet z Závady NN		887,00	683,00	275,00	609,00	911,00	1635,00	1236,00	6236,00
Celkem Součet z Závady VN		51,00	27,00	11,00	13,00	17,00	51,00	14,00	184,00
Celkem Počet měření		266,00	515,00	71,00	188,00	288,00	1235,00	646,00	3209,00

Výsledky ukazují, že nejvyšší závadovost je na kioskových DTS. Pokud nebudeme uvažovat složitosti zapojení DTS, bylo vyhodnoceno až 48 závad na jedno měření. Tato hodnota je však jedinečná a celkovou představu výsledků lépe utváří vypočtené průměrné hodnoty, které jsou uvedeny v předchozích tabulkách. Pro optické porovnání je přidán obrázek Obr. 61. , kde jsou zobrazeny průměrné hodnoty nalezených problémů na jedno měření, pro obě oblasti. Obrázek obsahuje porovnání pro kioskové a stožárové provedení. Můžeme říci, že nalezené výsledky by měly odpovídat stáří daných DTS a jejich složitosti. Pokud jde o nejproblémovější zařízení, pak nejhorším prvkem se jeví pojistka, která tvořila přes 55 % nalezených problémů. Může to být dáno tím, že často používané nožové pojistky jsou třetího charakteru a jejich kontaktní systém může být znehodnocován povrchovou oxidací a degradací kontaktního spojení prvků.



Obr. 61 Porovnání průměrných hodnot pro jednotlivé roky u obou oblastí

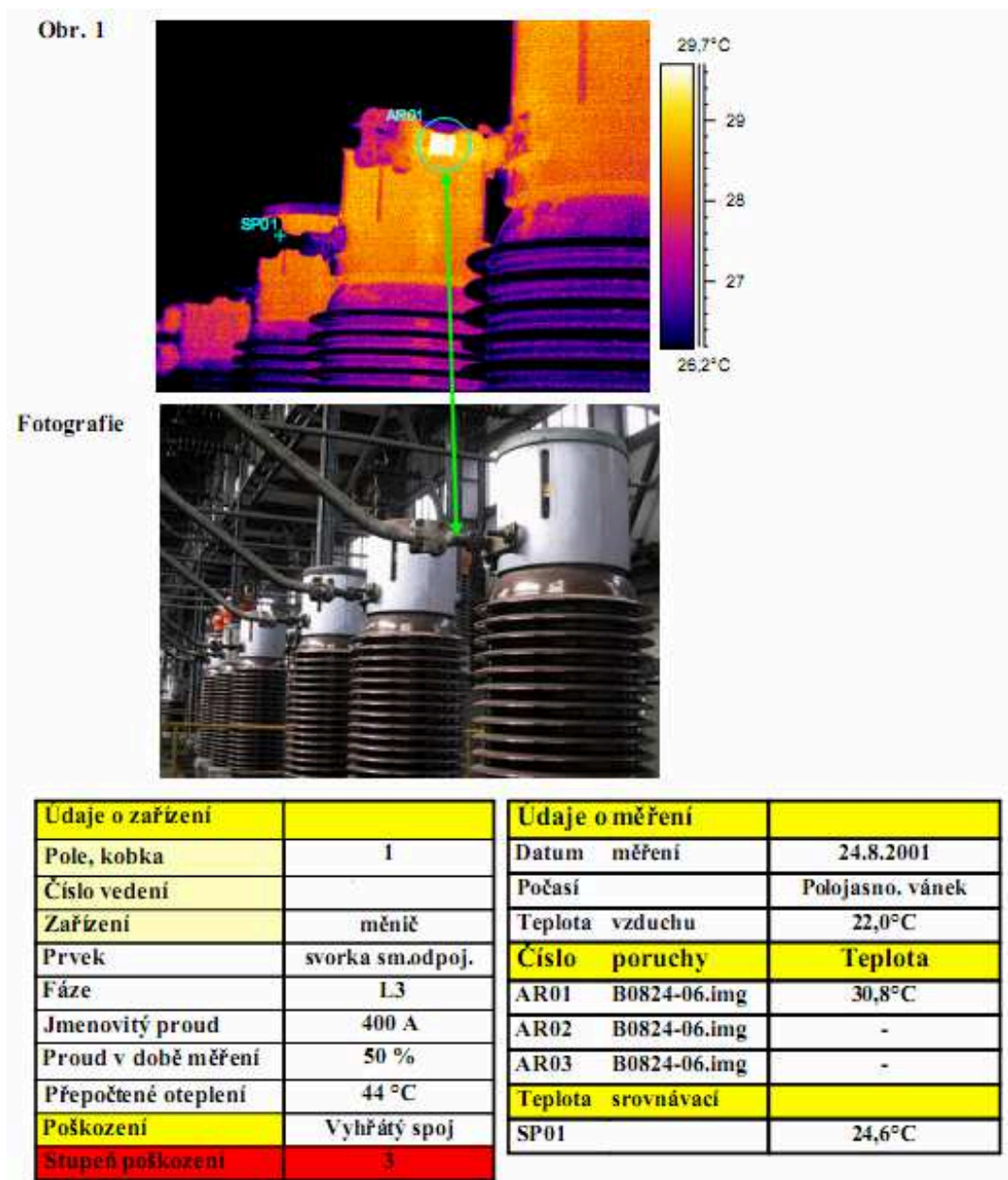
Pro jednotlivá provedení pak nebyla zobrazena závažnost jednotlivých nalezených problémů dle stupně oteplení. Pro doplnění může být dodáno, že až 70 % nalezených problémů může být diagnostikováno ve stupni 4.

## 6.2 ROZVODNY

Rozvodny jsou páteřními prvky celé energetické sítě. Jejich složitost je oproti DTS větší. Obsahují více pohyblivých prvků a komplikovanější systém propojení. Jejich základní dělení je na venkovní a vnitřní. Strukturálně většinou obsahují i více než dvě napěťové hladiny, což je závislé na umístění rozvodny v rámci celé sítě. Nejsložitější bývají ty, co zabezpečují propojení přenosové a distribuční sítě.

Z pohledu termodiagnostiky je důležité kontrolovat každé propojení, jak pevné, tak pohyblivé. Většina spojů bývá šroubovaných a vyskytují se zde prvky, které obsahují otevřený kontaktní systém. Jako příklad můžeme uvést odpojovač. Jsou zde i celé zapouzdřené prvky a poslední dobou se rozvíjí i celé zapouzdřené rozvody, kde je to s termodiagnostickou kontrolou složité. Pokud sledujeme prvky se zapouzdřeným kontaktním systémem, je důležité kontrolovat jejich připojení do vnějšího obvodu.

Při analýze části databáze, která obsahuje měření z rozvodů, se budeme zabývat nejproblémovějšími zařízeními v rámci rozvodů a počtem poruch zjištěných na rozvodnách. První část subdatabáze obsahuje cca 1100 záznamů a měřilo se na cca 80 rozvodnách v letech 2002 a 2003. Pro příklad je vybrán protokol, kde byl diagnostikován problém na propojce na měřícím transformátoru napětí pro pole 110 kV. Příkladový výňatek z protokolu má označení Obr. 62. Na ukázce jsou vidět i základní údaje, které popisují provozní stav zařízení a okolní prostředí v době měření.



Obr. 62 Ukázka problému nalezeného při měření na rozvodnách

V první části bude podrobnější rozbor závadovosti jednotlivých prvků a zařízení pro rozvodny, jehož popis byl už uveden nad předchozím obrázkem, druhá část se zaměří na nalezené problémy v celkovém rozsahu let 2002– 2009.

Pro první část nám Obr. 63 ukazuje upravenou základní databázi, která slouží jako výchozí pro nejproblémovější zařízení na rozvodnách. Tato část databáze oproti druhé části, která bude použita dále, neobsahuje data o tom kolik zařízení v rozvodnách je, ale soustředí se na popis stupně oteplení přímo prvků, na kterých byl problém nalezen.

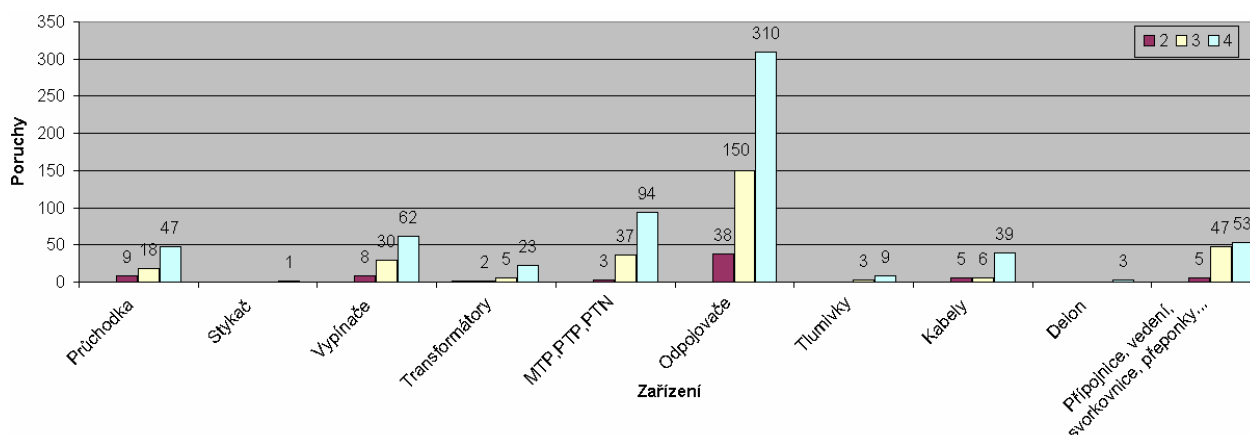
Rok	Dat.	Měřil	Protokl	Obraz	Por.	OSÚ
2002	18.3.		203181	C0318-09	1	
2002	18.3.		203181	C0318-10	1	
2002	18.3.		203181	C0318-10	2	
2002	18.3.		203181	C0318-07	1	
2002	18.3.		203181	C0318-08	1	
2002	18.3.		203181	C0318-02	1	
2002	18.3.		203181	C0318-03	1	
2002	18.3.		203181	C0318-04	1	
2002	18.3.		203181	C0318-05	1	
2002	18.3.		203181	C0318-06	1	

Rozvodna	Napět	Pole	Zařízení	Prvek	Fáze	Stupeň
	110	3	B odpojovač	Svorka	L1	4
	110	3	Klesačka	Svorka	L1	4
	110	3	Klesačka	Svorka	L3	4
	110	TI 1	Odpojovač	Nůž	PE	4
	110	TI 1	Tlumivka	Svorka	PE	3
	110	9	B odpojovač	Svorka	L3	4
	110	9	PTP	Svorka	L2	4
	110	9	V odpojovač	Svorka	L3	3
	110	9	V odpojovač	Svorka	L1	4
	110	9	Tlumivka	Svorka	L1	4

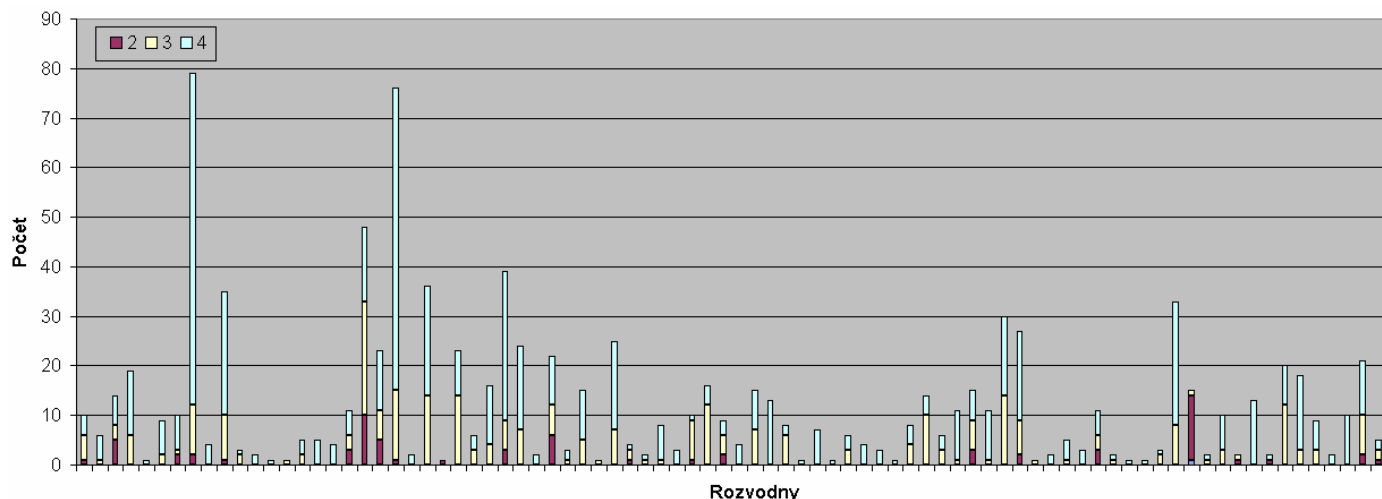
Obr. 63 Upravená databáze pro rozvodny

Databáze je poměrně podrobná, její složky ukazuje předchozí obrázek. Pro nás jsou nejzajímavější položky definující rozvodnu a další, které definují zařízení, prvek a stupeň oteplení. Tato databáze slučuje rozvodny v oblasti jedna a dva. Následující obrázek nám ukáže nejproblémovější zařízení, která byla nalezena pomocí této analýzy.



Obr. 64 Rozdělení zařízení dle stupně oteplení a nalezených poruch

Z grafu na obrázku pak můžeme vidět, že velká část závad se vyskytuje ve čtvrtém stupni oteplení, což je varující pro údržbu. Jelikož tento stupeň ukazuje, že zařízení, nebo jeho část je ve velice špatném stavu. Z tabulky je vidět, že nejproblémovějším zařízením jsou odpojovače, jejichž podíl na závadách je až 50 %. Je to dáno tím, že tento prvek je používán velice často. Jedná se o prvky s mechanickým pohybem a otevřeným kontaktním systémem, který musí odolávat atmosférickým podmínkám. Po odpojovačích následují měřicí transformátory, vypínače, průchodky a další. Pro lepší porovnání je uveden i počet jednotlivých nalezených problémů nad každým sloupcem v grafu. Toto je hodnocení zařízení, pokud se budeme věnovat problémovým prvkům zařízení, tak majoritně se problémy ukazují na spojkách, kontaktech, svornících, šroubových spojkách a další prvky se objevují náhodně.



Obr. 65 Závadovost na jednotlivých rozvodnách v letech 2002 a 2003

Předchozí obrázek Obr. 65 nám vyznačuje, jak se jednotlivé nalezené položky rozdělí mezi jednotlivé rozvodny. Názvy jednotlivých objektů byly úmyslně vynechány. Maximální sloupce pak obsahují až přes sedmdesát záznamů, kde ve stupni čtyři se vyskytuje vždy více než 70 % nalezených položek. Průměr nalezených problémů na jednu rozvodnu dělá 12. Pokud se jedná o stupeň oteplení dva, je to 0,8 nálezu na rozvodnu, ve stupni tři je to 3,5 nálezu na rozvodnu a ve stupni čtyři je to 7,6 položek na rozvodnu. Následně je přidána tabulka, která ukazuje, jak se jednotlivé nalezené položky rozloží do napěťových hladin. Rozložení odpovídá obsazenosti vybavení v jednotlivých rozvodnách, kde majoritně se vyskytuje hladina 22 a 110 kV.

Tab. 14 Závady dle napětí

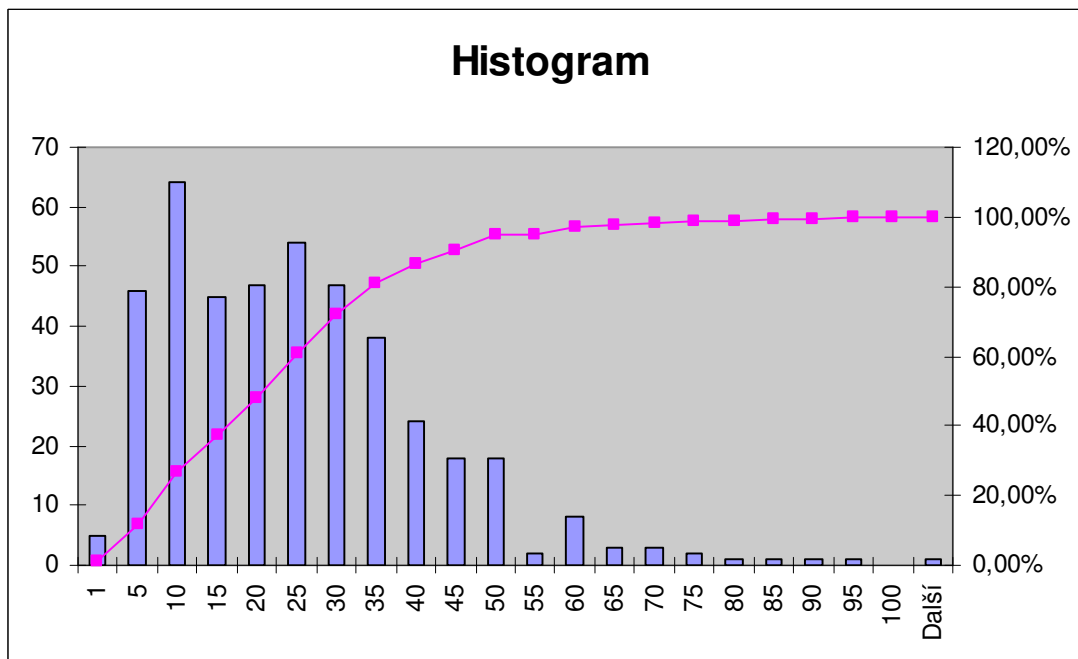
Napětí [kV]	0,4	6	10	22	110
Závady [kus]	37	193	7	543	244

Druhý díl databáze rozvoden v rozsahu let 2004 – 2009 obsahuje počet problémů nalezených na jednotlivých rozvodnách. Tato databáze se od první části liší tak, že nezobrazuje stupeň oteplení, ale ukazuje počet změřených kopek, transformátorů a polí. To nám poukazuje na jednotlivé napěťové hladiny a složitost daného objektu. Pro představu přidávám vzhled upravené výchozí databáze, který je zobrazen pod tímto odstavcem.

Středisko	Rozvodna	Počet polí	Počet TR	Počet kobek	Počet kobek	Počet kobek	Počet TR
		110 kV	110/VN a ji	22 kV	10 kV	6,3 kV	VN/VN
		32	4	20	0	0	0
		0	0	14	0	0	0
		8	3	0	0	0	0
		14	2	0	0	0	0
		4	2	11	0	15	0
		0	0	20	0	0	0
Počet TR	Skříně	Závady			Datum	Hodno	
VS	nn	vvn	vn	nn			
2	23	3	0	0	2.2.09		
2	5	0	0	0	4.2.09		
0	4	0	0	0	18.2.09		
0	4	7	0	0	13.2.09		
2	4	1	3	0	17.2.09		
1	3	0	0	0	3.2.09		

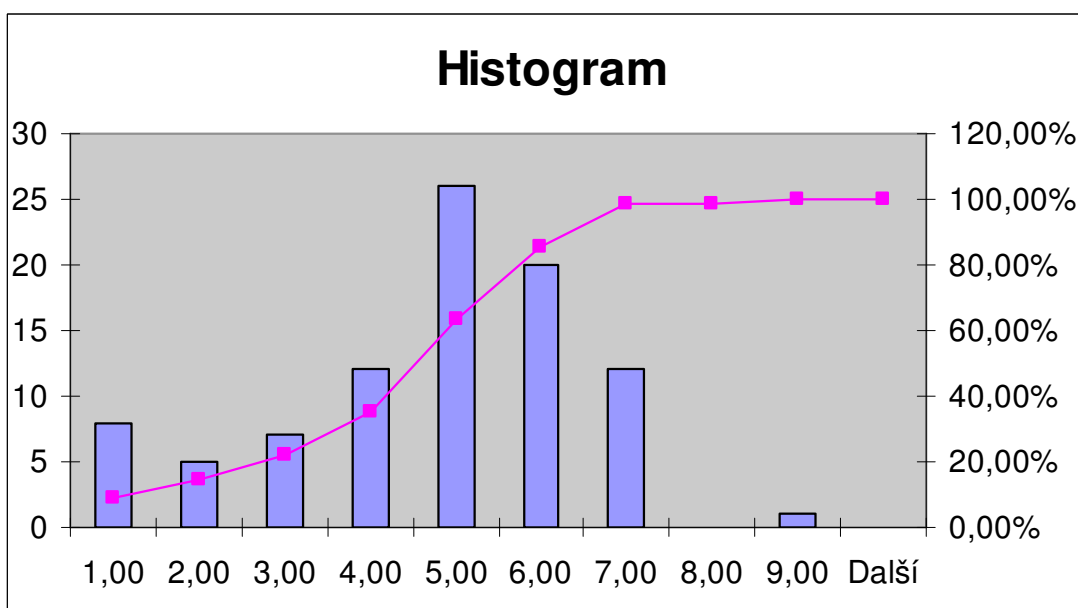
Obr. 66 Upravená výchozí databáze pro druhou část analýzy rozvoden

První vyhodnocenou položkou je počet měřených objektů při kontrole jedné rozvodny. Nikdy se nekontrolovala všechna zařízení, vždy jen část. Jak je vidět z předchozího obrázku, tak zařízení jsou dělena do 8 skupin. Dle těchto skupin se pak provádí kontrola vždy jen části zařízení. Z následujícího histogramu můžeme vidět počty zkontrolovaných prvků na jednu kontrolu v rozvodně.



Obr. 67 Histogram počtu kontrolovaných zařízení na jednu kontrolu rozvodny (osa x – Třidy, osa y Počet)

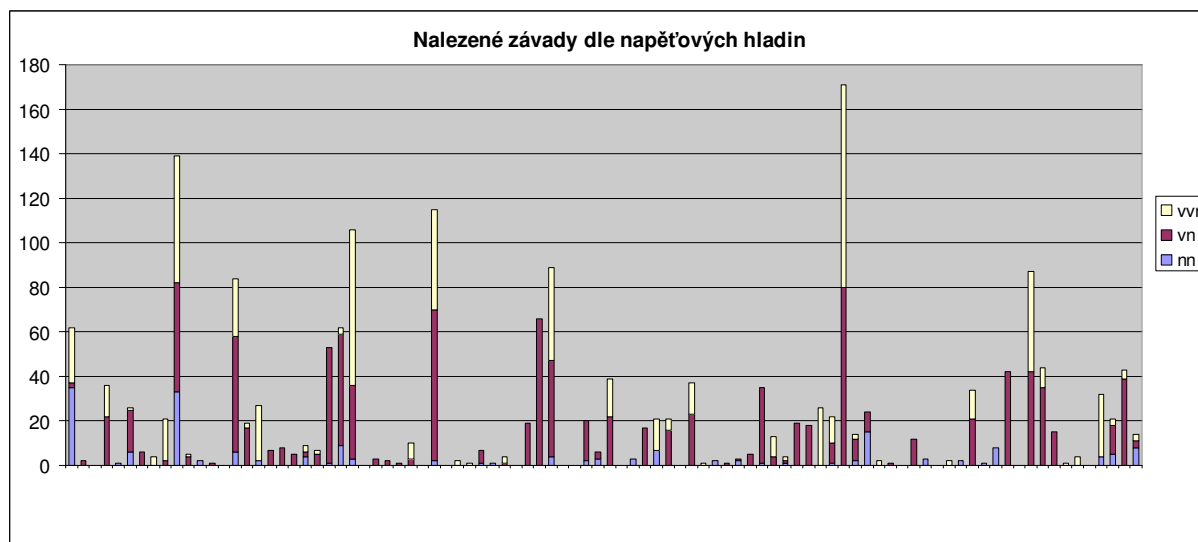
Z obrázku Obr. 67 můžeme vidět, že se provádí kontrola průměrně 23 zařízení na jednu kontrolu rozvodny a rozsah počtu je majoritně od 5 do 35 zařízení. Zde záleží na složitosti rozvodny a zařízení. Počet kontrol rozvodnen 429 za roky 2004 - 2009. Rozvoden je 91. Počet kontrol jednotlivých rozvodnen je znázorněna na následujícím histogramu.



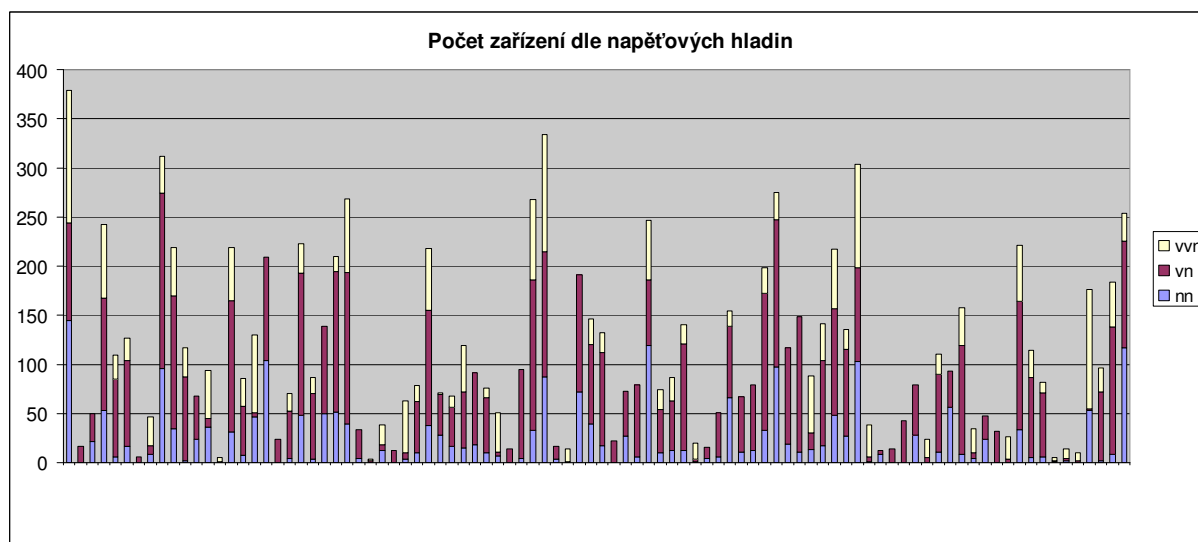
Obr. 68 Histogram počtu kontrol na jednotlivých rozvodnách (osa x – Třidy, osa y Počet)



Bylo zkontrolováno na 10000 zařízení na všech rozvodnách. Je možné, že se kontrola některých zařízení opakuje. Počet nalezených závad na jednu kontrolu je 4,4 a celkově bylo nalezeno přes 1900 závad. Počet nalezených závad můžete vidět na následujícím grafu Obr. 69 a ihned po něm následuje počet měřených zařízení v jednotlivých skupinách. Pro všechny rozvodny je pak jejich sloupec rozdělen v poměru nalezených závad na jednotlivých napěťových hladinách a v grafu Obr. 70 je rozdělení stejné (odpovídá počtu zařízení na jednotlivých napěťových hladinách).



Obr. 69 Graf nalezených závad dle napěťových hladin pro jednotlivé rozvodny\*



Obr. 70 Graf kontrolovaných zařízení dle napěťových hladin pro jednotlivé rozvodny

Pokud chceme popsat nalezené problémy dle napěťových hladin, pak můžeme definovat následující průměry: nn - 0,085, vn – 0,197, vvn – 0,288. Tyto průměry nám zobrazují počet nalezených problémů na jedno měřené zařízení dle napěťových hladin. Celkový průměr pak vychází na 0,19 závad na jedno zařízení.

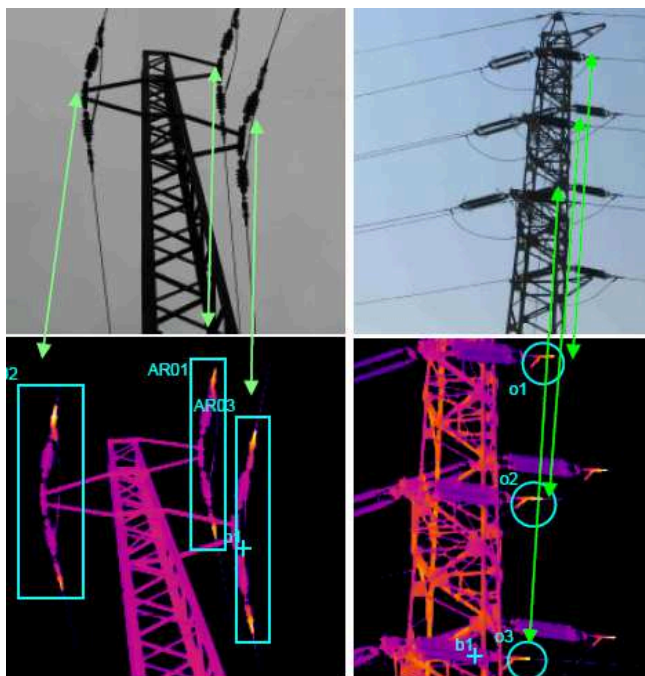
\* Pro větší přehlednost jsou vynechány popisky os. Osa x jsou rozvodny a osa y je počet. Rozvodny jsou řazeny v obou grafech ve stejném pořadí.

### 6.3 VEDENÍ

V následující části se budeme věnovat nadzemním vedením, nejsou zde začleněny kabely. Můžeme říci, že veškerá zde uvedená data budou z napěťových hladin 22 a 110 kV, které se vyskytují v dané oblasti distribuční sítě. Tato vedení jsou provedena konstrukčně z AlFe lan různých průřezů a uspořádání. U vn sítí jde většinou o třívodičové zavěšení, u vvn bývá většinou vodičů sedm (šest fázových a jedno zemnicí lano).

Pokud budeme porovnávat složitost, tak vedení vvn má vyšší konstrukční výšku a většinou složitější provedení sloupů, kterému odpovídá počet konstrukčních spojení vodičů. U vedení vn je provedení značně jednodušší, ale objevují se prvky, které vvn soustava nemá, např. úsekové odpojovače, reclosery, měřicí stanoviště a další. Tyto prvky pak vedení přidávají na složitosti. Dále můžeme říci, že u vedení vn je větší proximita trafostanic a hustější pokrytí území, čímž je celková délka vedení větší. Kdežto vedení vvn má větší distribuční důležitost, protože poskytuje napájení rozveden na pokrytí výkonové vn potřeby. Pro ukázkou přidáváme obrázek

Obr. 71. se zahřátými svorkami. Levý obrázek zobrazuje vedení vn a pravý vedení vvn.



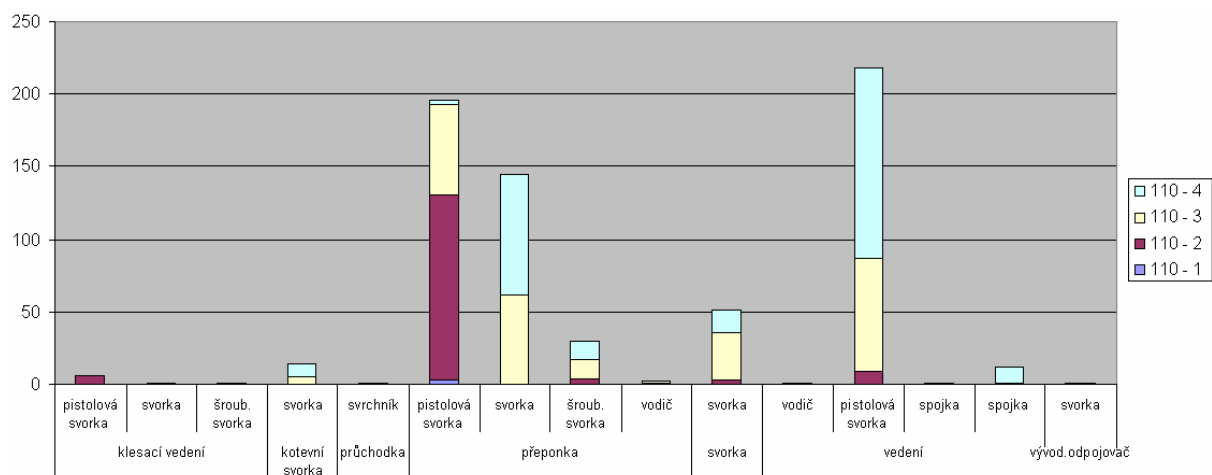
**Obr. 71** Nalezené závady na sloupech

Subdatabázi vedení rozdělíme na dvě části. U první části databáze bylo sledováno období 2002 - 2003, kde bylo zaznamenáno cca. 1050 záznamů. Byly sledovány obě oblasti. Bohužel není možné zjistit délky sledovaných úseků a jsou zaznamenána jen data nalezených závad. Z celkových záznamů patří asi 380 na hladinu vn a zbytek na hladinu vvn.

Tab. 15 Problémové prvky na vedení

Část	Prvek	Stupeň oteplení			Celkem
		2	3	4	
Klesací vedení	Pistolová svorka	6	0	0	6
	Svorka	0	1	0	1
	Šroubová svorka	0	0	1	1
Kotevní svorka	Svorka	0	5	9	14
Průchodka	Tělo	0	1	0	1
Přeponka	Pistolová svorka	127	63	3	193
	Svorka	0	62	82	144
	Šroubová svorka	4	13	13	30
	Vodič	1	1	0	2
Svorka	Svorka	3	33	15	51
Vedení	Bodič	0	0	1	1
	Pistolová svorka	9	78	131	218
	Propoj	0	1	12	13
Celkem		150	258	267	675

Vyhodnocením jsme zjistili neproblémovější části vedení. U vedení 22 kV jsou to majoritně spojky různého druhu a to z 80 %. Ostatní závady se našly např. na bleskojistkách, izolátorech, pojistkách atd. Více už se vedením 22 kV nebudeme zabývat a větší pozornost bude věnována vvn vedením.



Obr. 72 Rozdělní závad dle nalezeného stupně\*

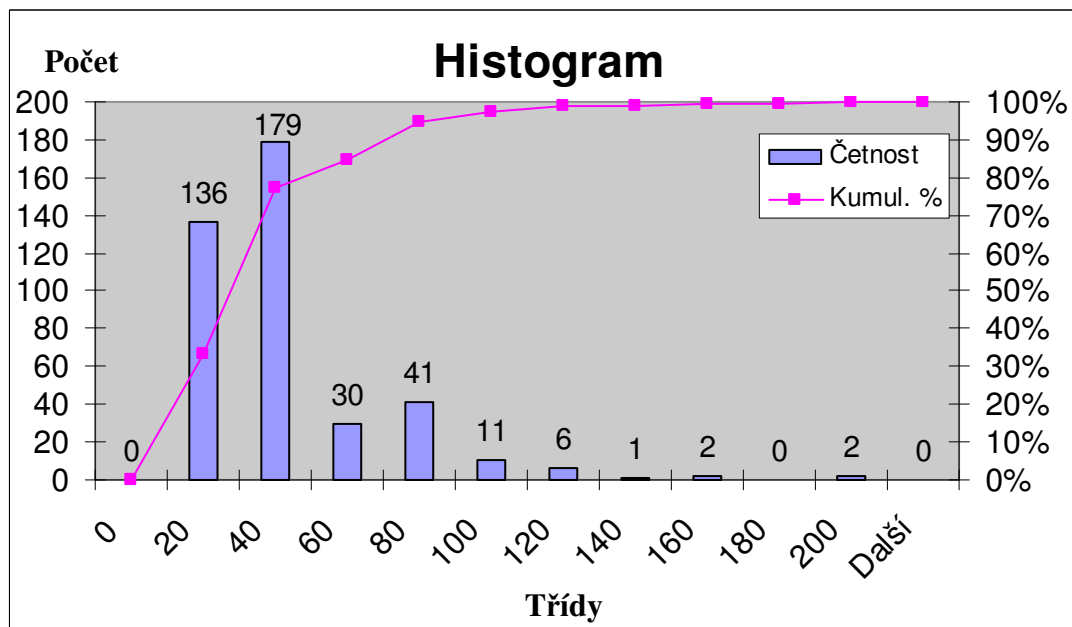
U 110 kV linek je celkové vyhodnocení zobrazeno v Tab. 15, která zachycuje nejproblémovější prvky na vedení vvn. Jako neproblémovější část se ukázala pistolová svorka, která se vyskytuje i u obou příkladů na

Obr. 71. Jde většinou o svorku, která se používá jako kotvící prvek na lanech vedení mezi armaturami stožárů. Mezi dalšími případy se ukázaly např. problémy s průchodkami a v ojedinělých případech i s vlastním vodičem. Dále je přidán graf, který ukazuje rozdělení jednotlivých nalezených závad mezi stupně oteplení. Ten je zobrazen na Obr. 72.

U části dva se budeme zabývat vedením VVN z pohledu závad nalezených po jejich délkách. Tato část nemá vyznačený stupeň oteplení pro jednotlivé problémy. Tato část byla měřena v letech 2004 až 2009 obsahuje data z obou oblastí. Kontroly byly provedeny ve 408 úsecích, kde celková délka je 3265 km. Průměrná hodnota vzdálenosti mezi sloupy je 238 metrů. Na celkové délce bylo použito na 13964 stožárů. Bylo nalezeno 1320 závad. Následuje histogram pozorovaných úseků Obr. 73. Na něm jsou zobrazeny počty kontrolovaných

\* Osa x zobrazuje počet nalezených závad a osa y zobrazuje prvky vedení. Popis není uveden, aby se co nejvíce zvětšila užitná plocha grafu a zlepšila se čitelnost.

stožárů na jeden kontrolovaný úsek. Pro délku kontrolovaného úseku stačí počet kontrolovaných stožárů násobit průměrnou délkou. Průměrná kontrolovaná délka je cca. 8000 metrů a průměrný počet kontrolovaných sloupů je 34 na jeden kontrolovaný úsek.



Obr. 73 Histogram počtu stožárů na jeden pozorovaný úsek

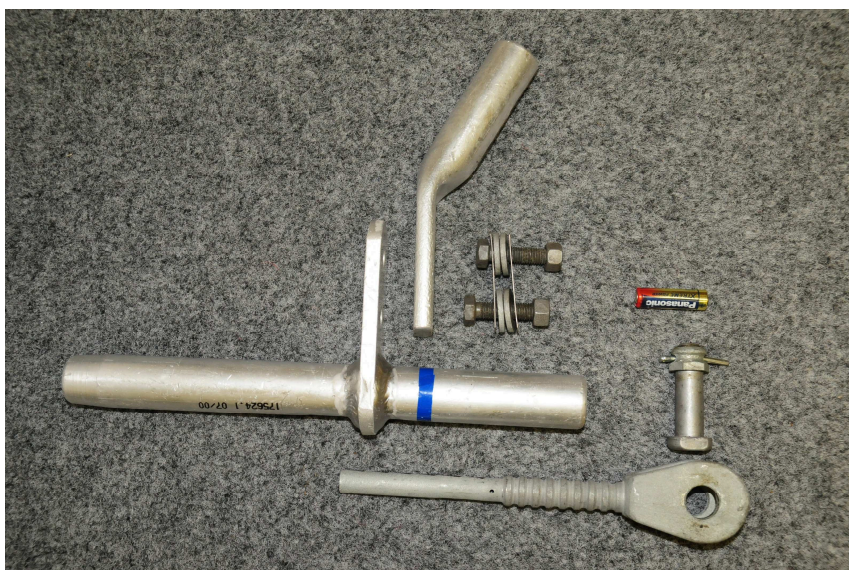
Pro výpočet průměrného počtu nalezených závad na jednu kontrolu použijeme vážený průměr, protože předpokládáme přímou úměru mezi délkou úseku a nalezeným počtem závad. Váhu jednotlivých úseků vypočteme poměrem délky úseku k maximální délce úseku. Výsledná hodnota váženého průměru je 0,3 závady na jeden kontrolovaný úsek.

## 7 ANALÝZA ZÁVADOVOSTI KOTEVNÍCH SVOREK

Při statistickém zpracování databáze jsme dostali výsledky, které svědčí o kvalitách provozovaných sítí. Ukazují, kde jsou problémy a upozorňují, kterým partiím distribučních sítí bychom se měli věnovat. Z našeho pohledu jsme částečně zhodnotili všechny řešené oblasti a částečně byly výsledky konzultovány s odborníky z praxe. Z podnětu našeho i ze strany praxe vyšly nové poznatky, které nás vedly k hlubšímu řešení problematiky nadzemních vedení a zvláště pak k problematice závadovosti kotevních pistolových svorek. Jak můžeme vidět v části 6.3 je pistolová svorka nejproblémovějším prvkem sledovaných vedení vvn. Tento prvek se již ve více případech stal stěžejním ve způsobení přerušení dodávky elektrické energie, kdy jeho porucha způsobila dysfunkci vedení. Problematika tohoto prvku bude probrána v následujících kapitolách.

### 7.1 DEFINICE PROBLÉMU

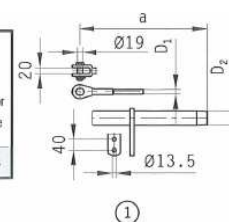
Prvek kotevní svorka je používán pro ukotvení vodiče přes izolátor k armaturám vedení. V našem případě budeme řešit kotevní pistolové svorky lisované za studena, které slouží ke kotvení AlFe lan. Jejich tělo se skládá z několika prvků, které se při montáži pneumaticky lisují. Zbylé části jsou smontovány pomocí klasických ocelových šroubů. Přichycení na izolátor je pomocí čepů jištěného závlačkou. Rozloženou svorku pak můžeme vidět na Obr. 74.



Obr. 74 Rozložená svorka

Pro lepší představivost o velikosti je na fotce přidaná baterie typu AA. Konstrukčně je proudovodná část svorky složená ze slitiny hliníku, ostatní konstrukční části jsou oceli a litiny. Jmenovité údaje této příkladové svorky jsou na Obr. 75.

Typ Type	Prierez vodiča Conductor cross section mm <sup>2</sup>	Priemer vodiča Conductor diameter mm	Poznávacie číslo Identity number		Rozmery Dimensions mm						I <sub>nn</sub> kA	Pevnosť uchytenia Strenght of attachment kN	Hmotnosť Weight kg	Al oko Al tube connector Typ Type
			Na Fe spojke Fe joint	Na Al spojke Al joint	a	a <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	c					
175 624.1	240/6	21.3	16 Fe	36 AlFe	390	-	16	36	-	40	70.8	1.58	616 624	



Obr. 75 Parametry svorky



Po kompletaci této svorky je svorka umístěna na armaturách vedení, kde musí odolávat atmosférickým podmínkám, procházejícímu proudu a namáhajícím silám od vodičů a ukotvení. Všechny tyto síly se promítají do její funkčnosti. Na Obr. 76 je ukázaná svorka, která byla odstraněna z provozu.



**Obr. 76 Svorka odstraněná z provozu.**

Jde o jiné provedení svorky než předchozí, uvedené na Obr. 76, ale z hlediska funkčnosti je svorka určena na stejný vodič AlFe 240 a stejné proudové zatížení. Konstruktivně se svorka liší v přivaření plochy pro přišroubování oka pro spodní lano. Zde je spodní část otočena od kolmice k ose svorky a otočena o devadesát stupňů ve vertikálním směru. Její katalogový list je obsáhlejší, a proto ho dodávám jako Příloha 3.

Svorek je samozřejmě používáno více druhů a velikostí. K zájmu o tuto problematiku nás přivedlo jejich fatální selhání, které je zobrazeno na Obr. 77. Toto selhání pak má totální vliv na funkčnost vedení. Závažnost problému ukazuje fakt, že tato porucha nebyla jedinečná, ale vyskytla se ve více případech.



**Obr. 77 Uhořelá kotevní svorka**

Naším zájmem je i dostat se k diagnóze co způsobuje jejich selhávání. Základní informace jsme obdrželi z praxe a jako další podklad nám poslouží protokoly z měření na vedení vvn,

kteřé už byly částečně rozebírány v předchozích částech. Při měření bylo nalezeno mnoho závadových svorek, ne však vždy ve čtvrtém závadovém stupni oteplení, o kterém jsme psali v kapitole 3.3 definice stavů. Při měření svorky často vykazovaly rapidní oteplení, které může ukazovat na stav, kdy na svorce probíhají zatím nezjištěné děje, které rapidně zkracují životnost těchto prvků a v extrémních stavech, kdy závady nejsou včas diagnostikovány a odstraněny, mohou vést i poruchám. Ukázky naměřených termogramů problémových kotevních svorek můžeme vidět na

Obr. 78.

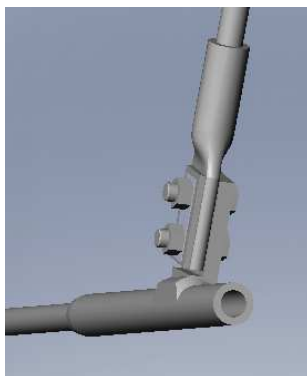


Obr. 78 Ukázka vyhřátých kotevních svorek

Předchozí obrázky ukazují závady nalezené na svorkách, kdy dalším krokem, který byl učiněn je modelování dějů, které mohou v těchto svorkách nastat.

## 7.2 MODELOVÁNÍ A SIMULACE PROUDOVÝCH DĚJŮ NA SVORKÁCH

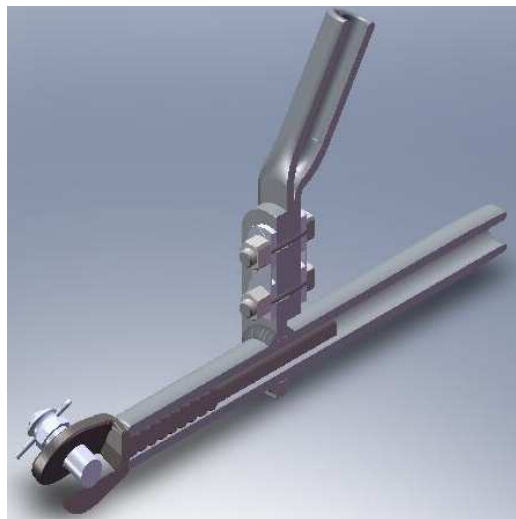
Pro praktické simulace byly využity obě předešlé svorky, které jsou zobrazeny na Obr. 74 a Obr. 76. Byly využity informace z katalogových listů výrobce a další potřebné informace byly odměřeny na reálných svorkách. Informace o materiálu byly použity dle standardních tabulek programu Ansys. Avšak nejprve byl dotazován výrobce, ten ale označil materiál svorek za výrobní tajemství, a proto byl poté použit ansys.



Obr. 79 Model staré svorky



Pro každou svorku byl vytvořen v programu Solid Works 3D geometrický model, který má skutečné měřítko jako reálná svorka. Na modelu byly upraveny jen některé informace pro kompatibilitu importu do programu Ansys. Geometrický model je zobrazen na Obr. 79, zde je ukázán model staré svorky v řezu. Na dalším obrázku Obr. 80 je ukázán pohled na novou svorku a její model v řezu.



**Obr. 80 Model svorky v řezu**

Geometrické modely byly importovány do programu Ansys Workbench, ve kterém byly jako první krok provedeny simulace ustálených proudových dějů, které ohřívají tělo svorky při normálním provozu, bez uvažování všech negativních vlivů. Program Ansys využívá metodu konečných prvků. Pro tyto simulace je nutné znát několik podmínek, které program vyžaduje pro korektní výpočet převedeného matematického modelu.

**První podmínka** je znalost materiálu a jeho parametrů. Jak už bylo řečeno, byly použity standardní materiály, které obsahuje program Ansys. Pro tělo svorky bylo použito materiálu „hliníková slitina“ a pro ostatní ocel. V tabulce materiálu je pak uvedena specifická tepelná vodivost a rezistivita materiálu.

**Druhá podmínka** je znalost výchozích tepelných poměrů pro tělo a okolí. Ty byly nastaveny dle prováděných simulací.

**Třetí podmínka** je znalost součinitele přestupu tepla, ten byl stanoven podle [12]. Součinitel přestupu tepla, také chladivost povrchu je dána ze dvou složek.

$$\lambda_0 = \lambda_k + \lambda_z [W / m^2 K] \quad (53)$$

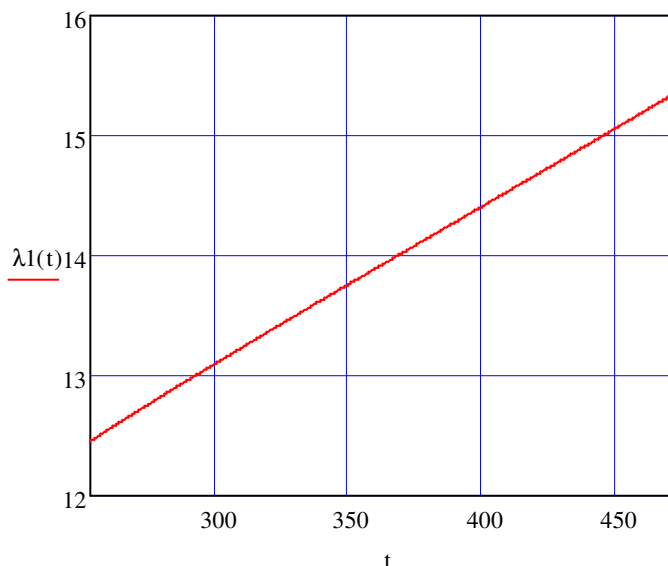
Kde  $\lambda_0$  je celková chladivost povrchu,  $\lambda_k$  je chladivost povrchu konvencí a  $\lambda_z$  je chladivost povrchu zářením do okolí. Pro  $\lambda_z$  je definován následující vztah.

$$\lambda_z = 5,7 \cdot 10^{-8} \varepsilon (T_0^2 + t^2) (T_0 + t) [W / m^2 K] \quad (54)$$

Kde  $\varepsilon$  je emisivita povrchu,  $T_0$  teplota okolí a  $t$  teplota povrchu. Následuje vztah chladivost povrchu prouděním, kde povrch svorky byl brán jako konkávní a byl pro tento případ nahrazen vztahem pro válec.

$$\lambda_k = 1,3 \left( \frac{t}{D} \right)^{0,25} [W / m^2 K] \quad (55)$$

Kde  $t$  je teplota a  $D$  je průměr válce. Pro výpočet výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla byl použit program Mathcad a výsledný graf můžete vidět na Obr. 81. Graf je zobrazen pro hodnoty veličin:  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,1$ ,  $D = 0,035\text{m}$ . Osa  $x$  je v  $K$  a osa  $y$  je  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

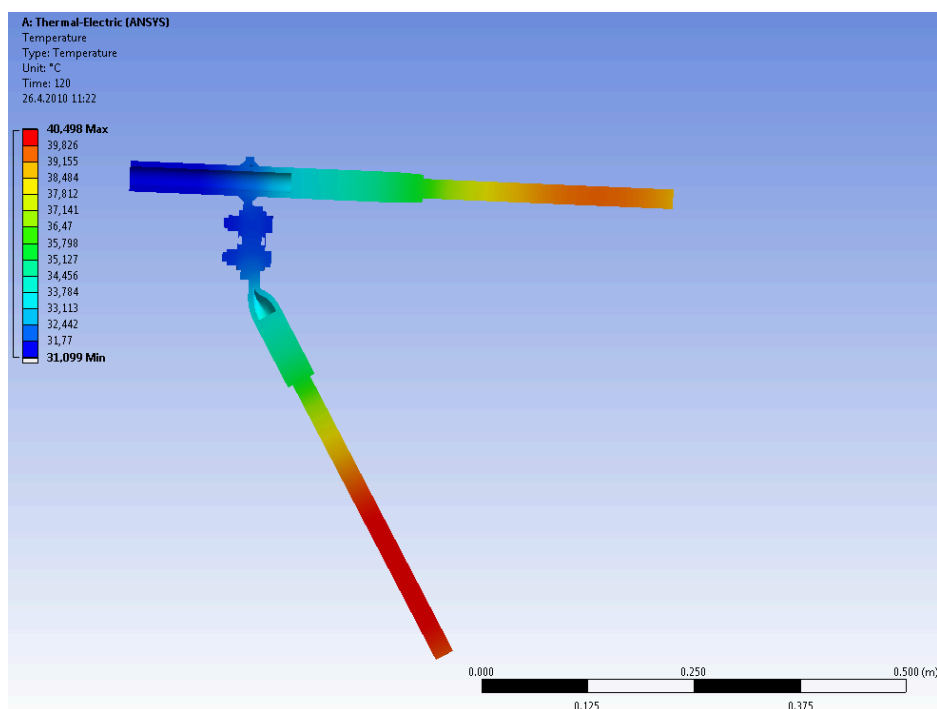


Obr. 81 Graf součinitele přestupu tepla

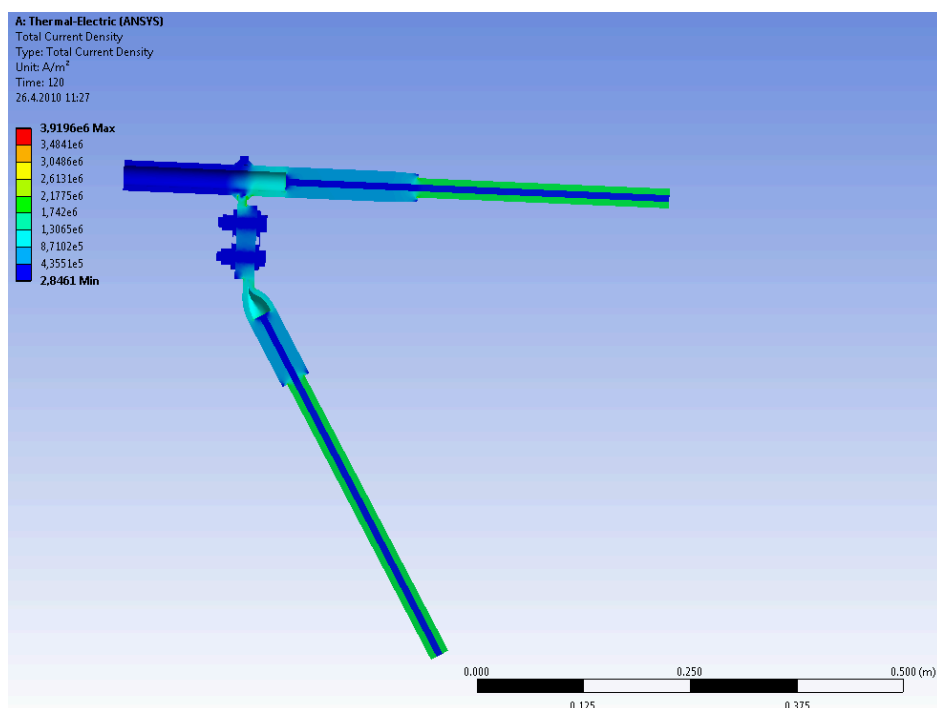
Zobrazená hodnota je pro rozmezí teplot - 20 až  $200^\circ\text{C}$ . Uvedené hodnoty byly vypočteny pro všechny uvažované povrchy a doplněny do simulačního programu. V následující simulaci je připojení lana na svorku nahrazeno válcovým plným vodičem, který je ze dvou vrstev odpovídajících materiálovému složení AlFe lana. Proudění uvažujeme minimální, a proto hodnoty  $\lambda_k$  vychází poměrně nízká.

### 7.2.1 MODELOVÁNÍ STANDARDNÍCH PROVOZNÍCH DĚJŮ NA SVORKÁCH

V první části simulací se podíváme na kontrolu běžného provozu svorek, kdy je tělo zatěžováno proudem, jehož hodnoty jdou od 300A do 660A, kdy okolní teplota je nastavena na  $25^\circ\text{C}$ . Dále proudění kolem svorky definujeme jako minimální, a proto je součinitel přestupu tepla nastaven dle předchozích údajů. V potaz nebyly brány přechodové odpory mezi vodičem a tělem svorky a kontaktní odpor ve šroubovém spoji části svorky, těmito se budeme zabývat později. Ze simulace byl vynechán díl, který slouží pro ukotvení na izolátor. Svorky jsou brány jako surové kusy kovu. Pro všechny simulace s proudem jsou vyneseny výstupní veličiny proudová hustota, úbytek napětí a teplota. V některých případech také tepelné ztráty a tepelný tok. Následuje zobrazení výsledků prvních simulací. První dva obrázky ukazují grafický výstup simulací pro teplotu a proudovou hustotu u nové svorky. U staré svorky je průběh teploty a proudové hustoty velice podobný, a proto zde nebude grafický výsledek uveden. Následuje popis kontrolních bodů na svorkách, tabulka s hodnotami  $J$ ,  $T$ ,  $\Delta U$  v kontrolních bodech a graf pro úbytek napětí. Všechny výsledky, grafické a numerické, jsou velice obsáhlé, a proto jsou připojeny jako celé protokoly ze simulací v Přílohách 4 a 5.



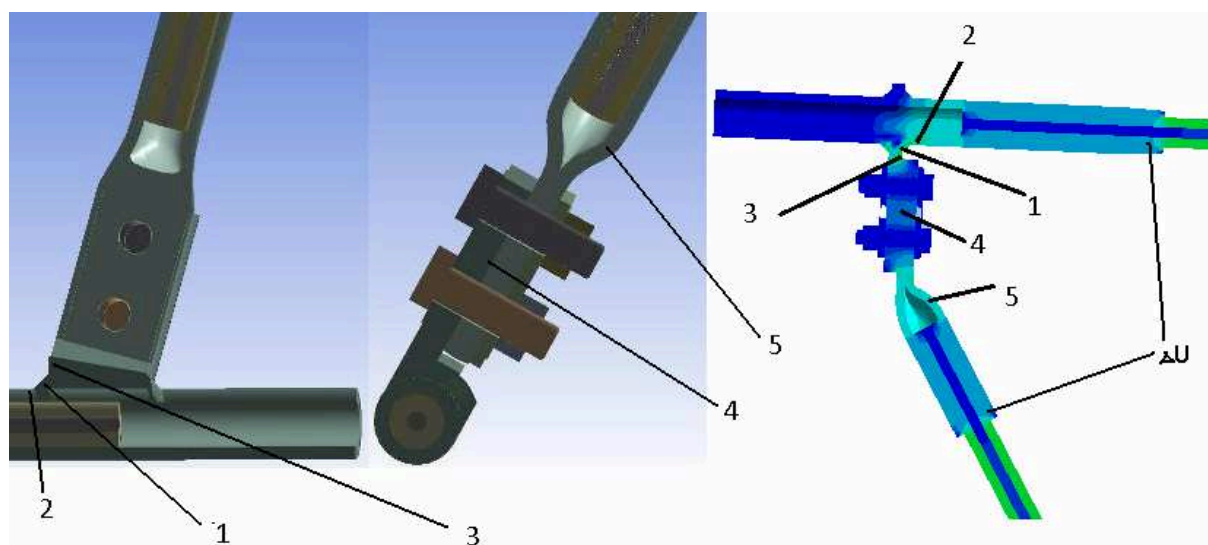
Obr. 82 Rozložení teploty pro teplotu okolí 25°C



Obr. 83 Rozložení proudové hustoty

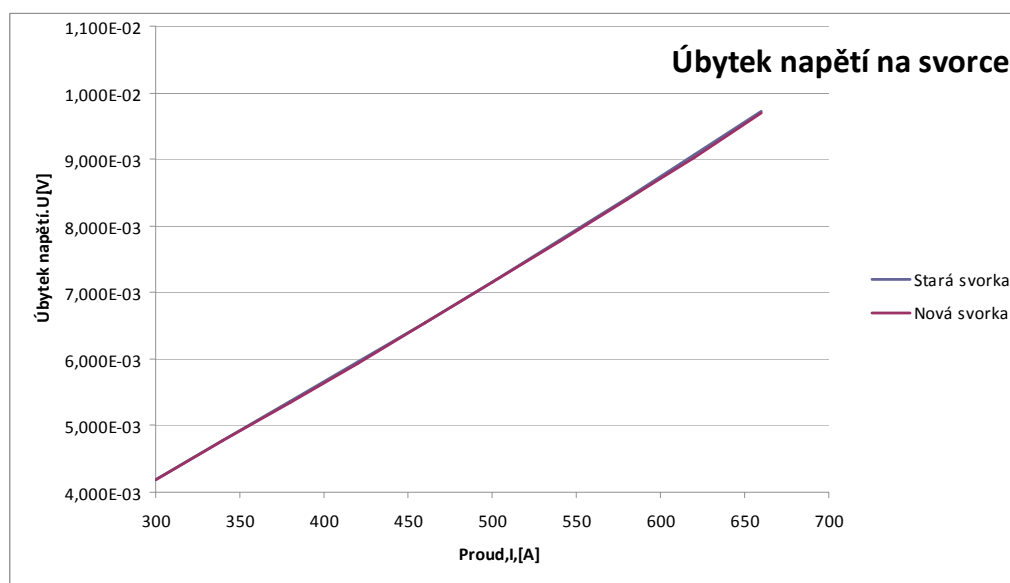
Pro základní simulaci bylo definováno pět bodů, kde byly spočteny hodnoty proudové hustoty, teploty, aby bylo možné provést jednoduché porovnání. Další dva body jsou pro úbytek napětí a jsou umístěny na konci těla svorky, aby úbytek napětí odpovídal úbytku napětí celé svorky. Základní body jsou umístěny ve stěžejních bodech, jeden je ve středu sváru mezi trubkou a ploškou pro přišroubování, další je pod svárem na trubce, třetí bod je na plošce pro přišroubování těsně nad svárem, čtvrtý bod je na středu kontaktní plochy mezi okem svorky a ploškou pro přišroubování a poslední bod je v ohybu oka svorky. Vizuálně jsou body zobrazeny na následujícím obrázku Obr. 84. Poloha bodu u těchto dvou svorek je přibližně podobná, ale nemůže být úplně ve stejném místě, protože svorky si geometricky

neodpovídají.



Obr. 84 Kontrolní body na svorkách (Levá – starší svorka, Pravá – nová svorka)

Jelikož si svorky geometricky neodpovídají, nemůžeme přesně srovnávat proudovou hustotu. S podstaty fungování svorky však můžeme srovnávat úbytky napětí. Ze simulací pak vyplývá následující průběh úbytku napětí na svorce v závislosti na proudu.



Obr. 85 Průběh úbytku napětí pro obě svorky

Z těchto dvou průběhů je patrné, že se překrývají a úbytek napětí je totožný. Z hodnot proudové hustoty a teploty můžeme vidět podobnost výsledků. Při bližším pohledu zjistíme, že u nové svorky jsou maximální hodnoty proudové hustoty v kontrolních bodech o něco vyšší. Celkový přehled o simulovaných hodnotách na obou svorkách pak můžeme vidět v následující tabulce, tabulka je otočená svisle, aby bylo možné ji vložit celou.

Pokud se jedná o komplexní hodnocení provozních vlastností svorky, pak můžeme říci, že obě svorky ve své základní podobě (bez parazitních vlivů) jsou navrženy dobře a vyhovují provozním podmínkám. Výsledky napovídají, že teplota, proudová hustota a úbytek

napětí jsou na tělech svorek přijatelné a jejich průběh vypovídá normálnímu provoznímu rozložení. Ze simulací můžeme také odhadnout jaká jsou nejproblémovější místa obou modelů a na jaké další simulace, pro určení problémů, se musíme zaměřit. Další simulace pak budou zaměřeny na přechodový odpor, na oblast svárů svorky, statické namáhání svorek atd.

**Tab. 16** Tabulka vypočtených hodnot ze simulací pro obě svorky (1 - stará svorka, 2 - nová svorka)

Svorka	Proud A	Střed svar.		Trubka p. s. $A \cdot m^{-2}$	Ploška n.s.		Střed k.s.	Ohyb oko		Svar	Trubka		Ploška n.		Střed k.		Oko oko		$\Delta U$	
		$A \cdot m^{-2}$			$A \cdot m^{-2}$			$A \cdot m^{-2}$			C		C		C		C		C	V
1	660	1,3580E+06		1,0237E+06	9,4878E+05	6,3714E+05	9,9701E+05	9,9701E+05		37,51	37,71		37,50		38,14		40,28		9,721E-03	
1	620	1,2756E+06		9,6159E+05	8,9120E+05	5,9869E+05	9,3641E+05	9,3641E+05		35,80	35,97		35,79		36,36		38,24		9,059E-03	
1	580	1,1935E+06		8,9973E+05	8,3386E+05	5,6036E+05	8,7614E+05	8,7614E+05		34,21	34,36		34,20		34,71		36,35		8,413E-03	
1	540	1,1111E+06		8,3760E+05	7,7627E+05	5,2182E+05	8,1555E+05	8,1555E+05		32,78	32,91		32,77		33,23		34,66		7,779E-03	
1	500	1,0289E+06		7,7563E+05	7,1883E+05	4,8334E+05	7,5518E+05	7,5518E+05		31,47	31,58		31,46		31,87		33,10		7,158E-03	
1	460	9,4669E+05		7,1369E+05	6,6141E+05	4,4484E+05	6,9484E+05	6,9484E+05		30,27	30,38		30,27		30,63		31,69		6,549E-03	
1	420	8,6426E+05		6,5155E+05	6,0382E+05	4,0620E+05	6,3428E+05	6,3428E+05		29,21	29,30		29,21		29,53		30,43		5,948E-03	
1	380	7,8203E+05		5,8955E+05	5,4636E+05	3,6762E+05	5,7392E+05	5,7392E+05		28,26	28,33		28,26		28,54		29,30		5,357E-03	
1	340	6,9976E+05		5,2754E+05	4,8888E+05	3,2901E+05	5,1353E+05	5,1353E+05		27,41	27,47		27,41		27,66		28,29		4,774E-03	
1	300	6,1748E+05		4,6551E+05	4,3140E+05	2,9037E+05	4,5314E+05	4,5314E+05		26,66	26,71		26,66		26,89		27,40		4,197E-03	
2	660	1,8104E+06		1,4802E+06	1,0922E+06	5,6385E+05	1,0825E+06	1,0825E+06		38,18	38,26		38,14		38,45		40,38		9,693E-03	
2	620	1,7006E+06		1,3904E+06	1,0259E+06	5,2951E+05	1,0167E+06	1,0167E+06		36,51	36,58		36,48		36,74		38,43		9,034E-03	
2	580	1,5910E+06		1,3008E+06	9,5976E+05	4,9531E+05	9,5122E+05	9,5122E+05		34,97	35,03		34,94		35,17		36,63		8,392E-03	
2	540	1,4814E+06		1,2112E+06	8,9363E+05	4,6110E+05	8,8567E+05	8,8567E+05		33,56	33,61		33,54		33,73		34,99		7,763E-03	
2	500	1,3714E+06		1,1213E+06	8,2726E+05	4,2678E+05	8,1984E+05	8,1984E+05		32,28	32,32		32,26		32,42		33,49		7,143E-03	
2	460	1,2618E+06		1,0318E+06	7,6117E+05	3,9264E+05	7,5436E+05	7,5436E+05		31,11	31,15		31,09		31,23		32,13		6,537E-03	
2	420	1,1522E+06		9,4215E+05	6,9504E+05	3,5848E+05	6,8882E+05	6,8882E+05		30,06	30,09		30,04		30,16		30,90		5,939E-03	
2	380	1,0425E+06		8,5249E+05	6,2888E+05	3,2432E+05	6,2326E+05	6,2326E+05		29,11	29,14		29,10		29,20		29,80		5,350E-03	
2	340	9,3287E+05		7,6284E+05	5,6273E+05	2,9018E+05	5,5771E+05	5,5771E+05		28,27	28,29		28,26		28,33		28,81		4,768E-03	
2	300	8,2282E+05		6,7285E+05	4,9634E+05	2,5592E+05	4,9187E+05	4,9187E+05		27,54	27,55		27,53		27,59		27,96		4,190E-03	

## 7.2.2 MODELOVÁNÍ VLIVŮ SVÁRŮ NA PROVOZ SVOREK

Z provozních simulací bylo ověřeno, že funkčnost svorek, ve svých výrobních podobách, není problematická. Simulace nám také ukázaly, kde se asi nachází stěžejní místa pro funkčnost svorek a jak dále pokračovat. Problémy v těchto stěžejních částech můžou způsobit nekorektní funkčnost celé svorky a dokonce i její případné selhání. V této kapitole se budeme zabývat sváry umístěnými na svorkách, protože jde o stěžejní části v proudovodné dráhy svorky.

U obou typů se vyskytují sváry jako stěžejní spoj mezi jednotlivými částmi svorky. Svar se účastní jak propojení proudové cesty, tak jako mechanický spoj pro spojení silově namáhaných částí. Jeho provedení je u obou typů rozdílné. U nové svorky jde o paralelní provedení dvou svárů v podobě kružnic, které vyvažují šroubovací díl a díl tvořený trubicou. U staré svorky je zavařen šroubovací díl a trubicový díl svárem jen na jedné straně trubky a jeho půdorysný profil tvoří čtverec. Pro větší představivost je přidán následující obrázek Obr. 86.



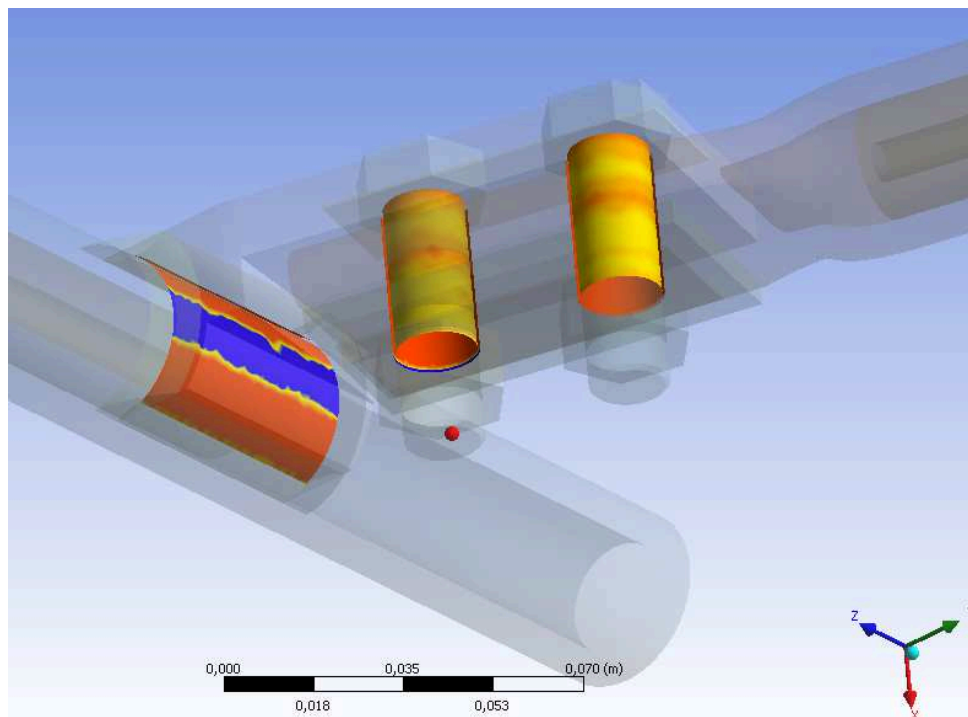
Obr. 86 Provedení svárů na obou svorkách

Nová svorka je v navaření rozdílná v tom, že šroubový díl je proveden tak, že i bez svárů není možné tento díl oddělit. Je otázkou, zda toto provedení je výhodnější.

V této části se nebudeme věnovat silovému namáhání svárů, ale podíváme se na jeho elektrické vlastnosti a jak jeho změny ovlivňují celkový chod svorky. Svár ve své podstatě je velice dobré, v tomto případě kovové, spojení, které zajišťuje dobré vedení proudu. Pokud je proveden v dostatečné velikosti a kvalitě postačí převést veškerý proud jen svým vlastním tělem. Ve skutečnosti se může část proudu přenášet i mimo svár, pokud to dovolují dotykové plochy svařených dílců.

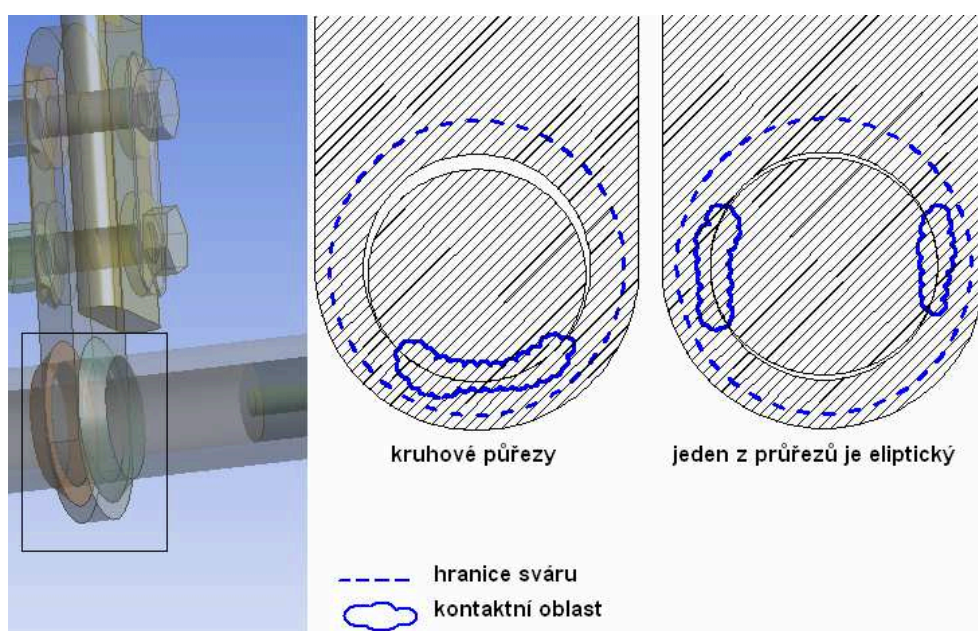
U staré svorky jsou svařované dílce k sobě přiblíženy a poté zavařeny. Kontaktní plocha, která je takto uvažována, je skryta pohledu. Její podoba může vypadat dle Obr. 87. U tohoto provedení kontaktu záleží na průhybu obou kontaktních ploch, pokud nebude stejný, může podoba kontaktu vypadat například takto. Modrá barva ukazuje oddálenou část a červená kontaktní část. Na obrázku jsou ještě dále vidět možné plochy v oblasti šroubu, těmi se budeme zabývat později. U tohoto provedení je důležité, aby svár byl proveden kvalitně, protože špatné provedení svárů má vliv také na mechanické vlastnosti svorky. Kromě tvarového provedení má také oxidace povrchu kontaktní plochy vliv na velikosti proudu, který je přenášen přes tuto plochu.





Obr. 87 Možná podoba kontaktní plochy svorek

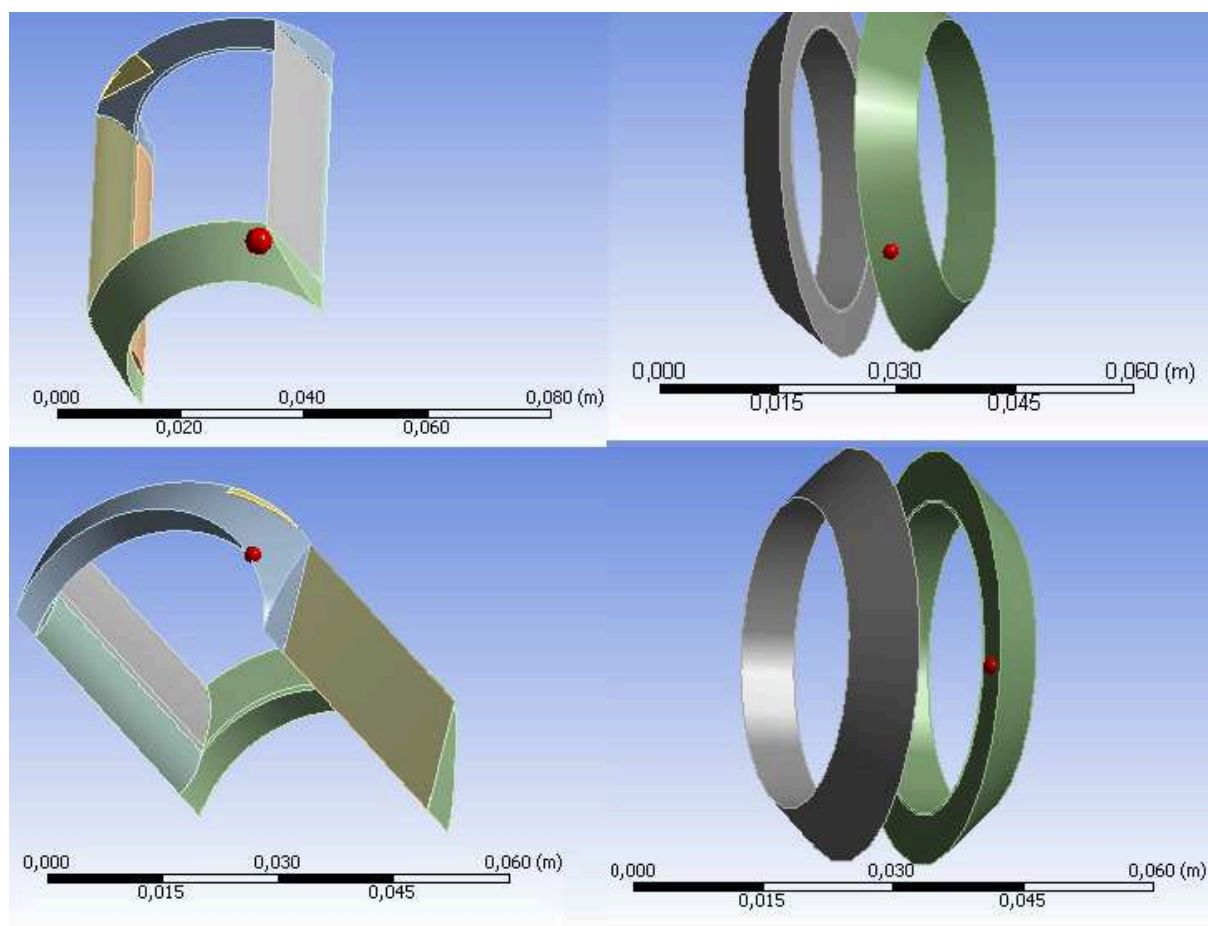
Nová svorka má svár provedený jiným způsobem a pro spojení dvou svařovaných dílců je potřeba, aby šroubová část byla přetažena na trubkovou část a poté zavařena. Toto provedení zaručuje, že svár nemusí nést veškeré mechanické zatížení, protože to může nést tělo šroubové části. Veškerá kontaktní plocha je pak vymezena tloušťkou šroubové svařované části. Ve skutečnosti však je kontaktní plocha menší, protože pro přetažení dílců je nutné, aby průměr otvoru byl o něco větší než průměr trubky. Toto pak zapříčiní, že pokud je otvor kulatý, pak je styk zabezpečen jen v malé části celé plochy. V případě eliptického může být styk až ve dvou plochách. Principiálně je to ukázáno na následujícím obrázku.



Obr. 88 Nová svorka kontakt v oblasti sváru



U skutečného kontaktu nikdy nedochází k ideálnímu propojení, ale vždy je přítomen přechodový odpor jako parazitní vlastnost, ten pak způsobuje vytlačení proudu z kontaktní plochy do svárů. Pokud je uvažován nejhorší případ, pak ve spojované oblasti vzniká minimální kontaktní plocha mimo oblast svárů, a proto ji můžeme zanedbat. V tomto případě jsou veškeré vlastnosti svorky závislé na vlastnostech svárů. Modelované případy pro obě svorky jsou právě pro tento nejhorší případ, kdy styčná plocha je minimální a s velkým přechodovým odporem. Vlastnosti sváru v modelu jsou pak dané jeho elektrickou a tepelnou vodivostí. Modelová podoba svárů pro oba dva typy svorek je vyhotovena dle skutečných svorek, které máme k dispozici. Je jasné, že sváry se u každého vyrobeného kusu liší, ale tyto mírné rozdíly v rozměrech sváru nemají vliv na jeho vlastnosti. Podoba svárů u obou svorek je na Obr. 89.



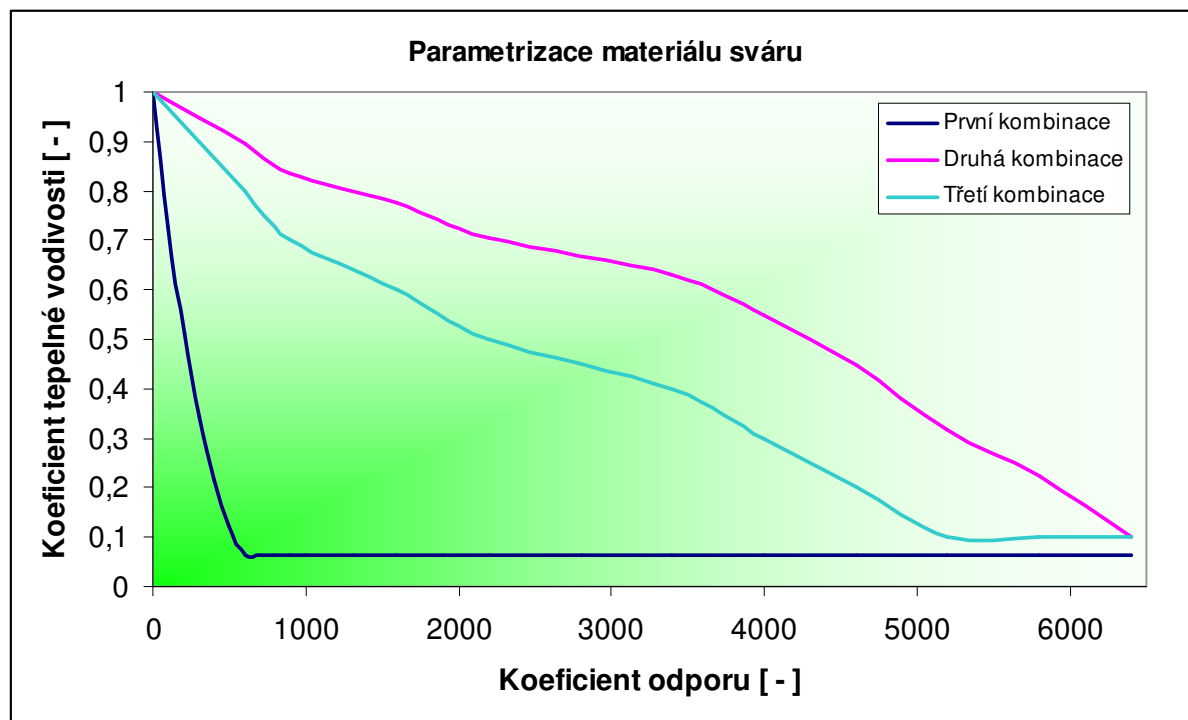
**Obr. 89 Podoba sváru na modelu (vlevo - stará svorka, vpravo - nová svorka)**

Pokud jde o provedení sváru, tak hliník a jeho slitiny jsou svařitelné, avšak jeho svaření není tak jednoduché jako vaření např. železa. Používá se ochranná atmosféra argonu, helia nebo kombinace těchto plynů. Metod svařování je více, používají se klasické MIG, TIG a dále existují více speciální např. svařování třením. V našem případě došlo při svařování k přidání přídavného materiálu, volba tohoto materiálu je velice důležitá pro vlastnosti sváru po jeho vyhotovení. Nevhodnou volbou dosáhneme toho, že v materiálu vznikají trhliny, což má vliv na kvalitu sváru. Obzvláště citlivé jsou hliníkové materiály s příměsí hořčíku a křemíku. Vhodné materiály můžeme najít v [34]. Dalším komplikací je oxidace. Hliník se poměrně rychle pokrývá vrstvou oxidu, jejíž tloušťka je závislá na prostředí ve kterém se vyskytuje. Při nevhodném postupu při svařování je to nevýhoda, ale v oblasti ochrany materiálu před

okolním prostředím je to výhodnější, protože vrstva je poměrně stálá a chrání tak na povrchu vnitřní část prvků jež jsou s hliníku a jeho slitin vyrobeny. Určité problémy pak nastávají u sloučenin, které obsahují měď. Tyto snadněji oxidují a podléhají vlivům okolního prostředí. Problematika svařování hliníku je velice rozsáhlá a není cílem této práce ji zde řešit, ale shrňme si, že při svařování hliníku může dojít k problémům již v několika krocích. Výsledkem toho může být svár, který je nekvalitní a znatelně rychleji může podlehnout vlivům okolního prostředí.[34], [35]

Vraťme se nyní k vlastním modelům svorek. Podobu svárů jsme si již ukázali na předchozím obrázku a teď jak byly provedeny simulace. Materiál sváru byl parametrizován a ostatní části svorek byly nastaveny stejně jako v předchozích provozních simulacích. Simulace šla krokově, kdy v každém kroku je snižována tepelná vodivost a zvyšován elektrický odpor. Simulace se soustředí na oblast sváru a okolní parazitní jevy jsou zanedbány. Mezní hodnotou, která je pro naši simulaci stěžejní je teplota 200°C, kdy dochází ke snížení mechanické pevnosti až na cca. jednu pětinu původní hodnoty. Samozřejmě závisí na materiálu. Přes svorku prochází jmenovitý proud. Jelikož je velice těžké určit jak se mohou měnit parametry materiálu a jejich rozložení v objemu sváru, je simulace zjednodušena. Vlastnosti materiálu svárů jsou homogenní a mění se jen elektrická a tepelná vodivost. Může to být chápáno tak, že složitost prostorových změn parametru je nahrazena jedním náhradním prvkem, kterému jsou měněny jen dva parametry.

Nastavení parametru je provedeno násobnými koeficienty, které násobí základní hodnotu veličiny při dané teplotě. Základní hodnoty vychází z tabulkových hodnot programu Ansys Workbench pro materiál „hliníková slitina“. Obě dvě veličiny jsou závislé s teplotou, a proto jsou definovány průběhem. Rezistivita materiálu má lineární průběh a tepelná vodivost je nelineární. Vzájemná změna vlastností materiálu je nepředvídatelná, proto jsou definovány tři průběhy násobných koeficientů, které můžeme vidět na následujícím obrázku Obr. 90. Dodržen byl předpoklad, že se zvyšováním odporu materiálu se jeho tepelná vodivost snižuje.

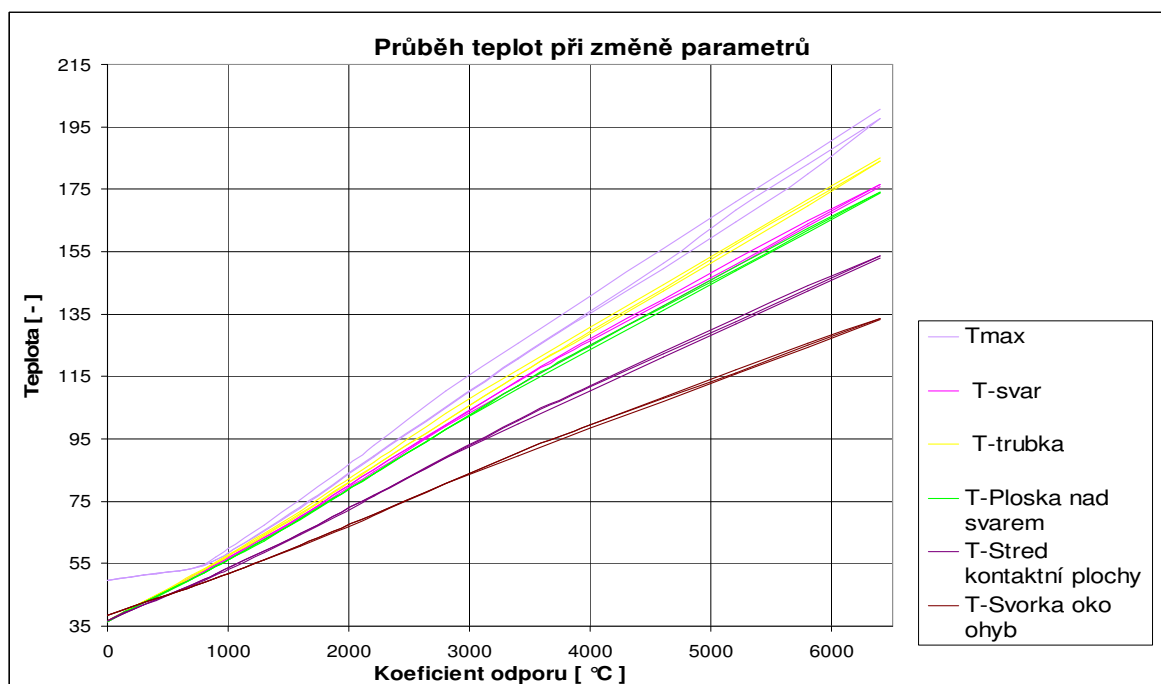


Obr. 90 Parametrizace změn odporu a tep. Vodivosti

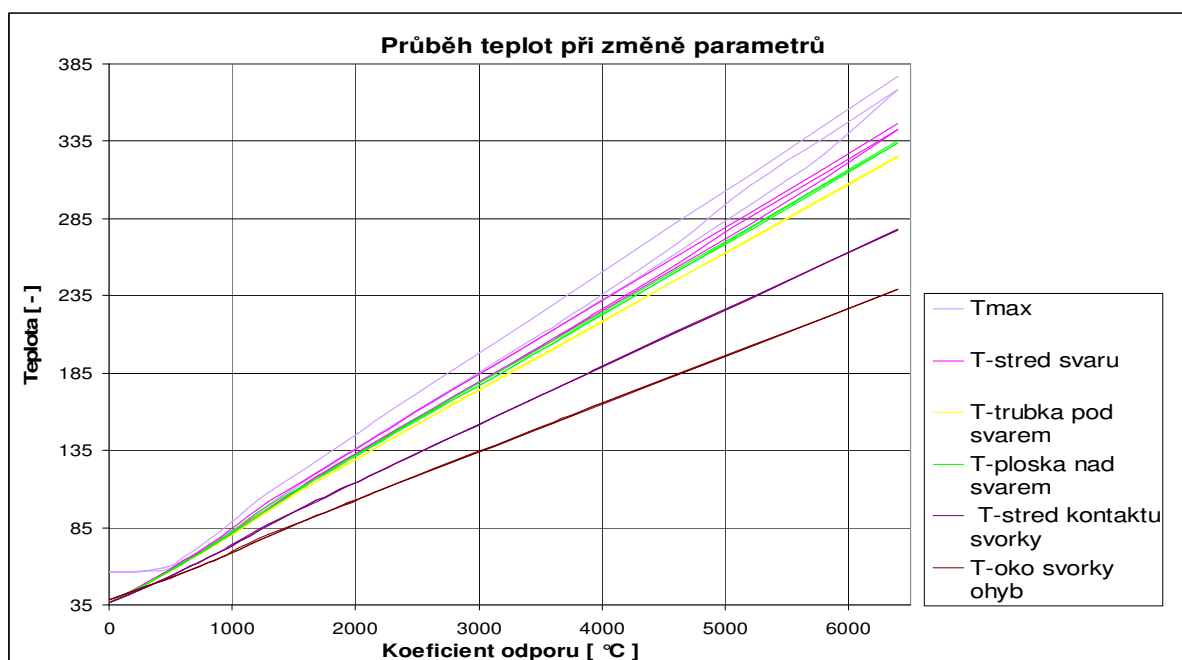
Všechny tři průběhy jsou nelineární a nemají úplně jednoduchý průběh, protože je

předpoklad, že změny tepelných a elektrických vlastností neprobíhají plynule, ale jsou závislé na vnějších a provozních vlivech. Nejvyšší hodnota násobného koeficientu odporu, která byla zařazena do výpočtu, je 6400 a nejmenší hodnota násobného koeficientu tepelné vodivosti je 0,064. Tyto hodnoty už klesají pod hodnoty uhlíku.

V následující části se už podíváme, jak vychází výsledky simulací. Prvním výstupem jsou grafy výsledných teplot Obr. 91 Obr. 92. Tyto teploty byly měřeny v bodech dle Obr. 84 v kapitole 7.2.1. a dále je ještě dodána hodnota maximální teploty nalezené na vypočteném modelu.



Obr. 91 Výsledné teploty simulací pro novou svorku

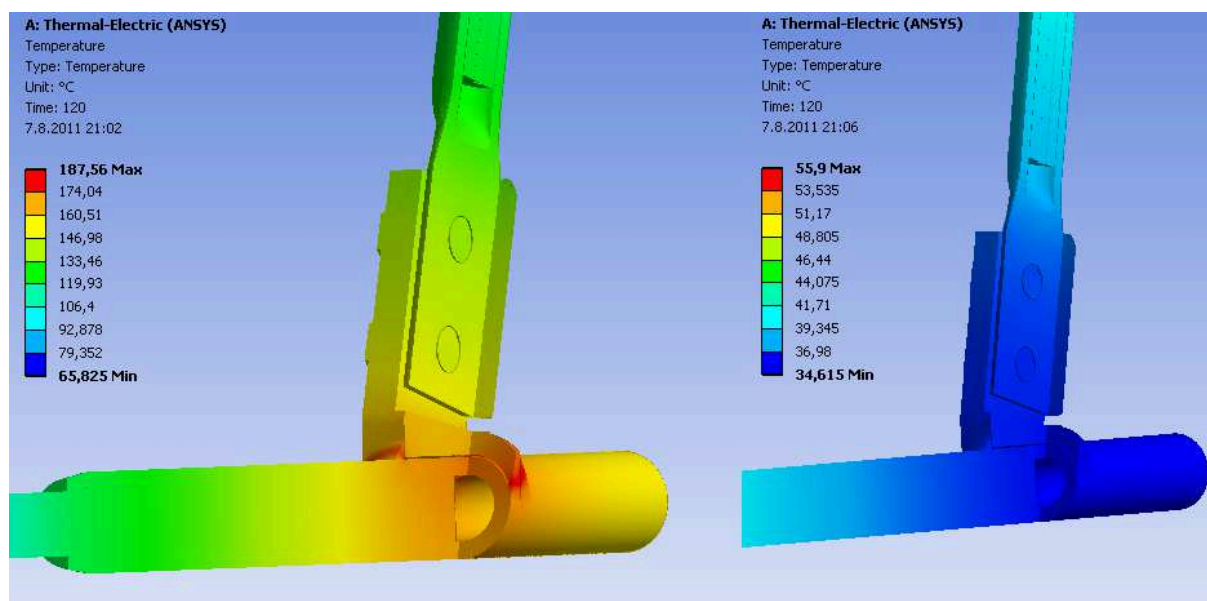


Obr. 92 Výsledné teploty simulací pro starou svorku

Pro každý simulovaný průběh odporu a tepelné vodivosti sváru je ukázán jeden průběh, pro jeden bod (jedna barva) jsou tedy zobrazeny tři průběhy. Jak můžete vidět, tak o hodně lépe vychází nová svorka, kde je rapidně menší vzrůst teploty se změnou parametrů. Pro lepší porovnání ještě ukážeme délky a průřezy sváru u obou typů svorek.

- Nová svorka – v celé délce stejný ( svařeno z obou stran) čtvrt kruhový s celkovou střední délkou sváru 302 mm, obvod průřezu je 21,36 mm a obsah průřezu sváru je 19,5 mm<sup>2</sup>.
- Stará svorka – v délce je dělen na dva průřezy (vždy 2x), přední a zadní čtvrt kruhový s obvodem průřezu 23,9 mm a průřezem 24,5 mm, celková střední délka 80,5 mm, druhá část podoba kruhové úseče s obou boků s obvodem průřezu 31,36 mm a průřezem 20,1 mm, kde celková střední délka je 100 mm. Celkový svár má pak střední délku 181 mm.

Dále můžeme říci, že u nové svorky je o něco větší hmota sváru, což pomáhá k lepšímu vedení proudu a tepla. Z průběhu také můžeme vidět, že změnou volby parametrizace průběhu odporu a tepelné vodivosti nedochází k větší změně průběhu teplot v daných bodech a jednotlivé linie se překrývají. Následující obrázek (číslo) pak ukazuje, rozdíl tepelného pole před degradováním parametrů a po degradování parametrů.

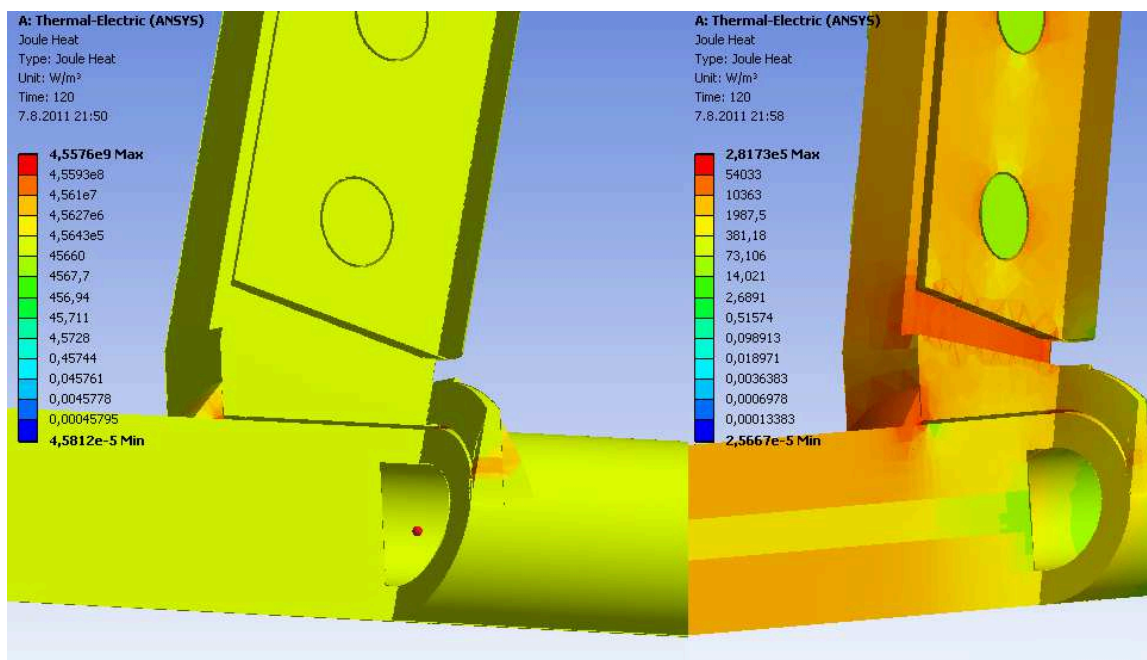


Obr. 93 Rozložení tepelného pole na řezu starou svorkou

Z Obr. 93 také můžeme vidět, že v oblasti přehřátého sváru dochází na jeho krajích, k dobrému odvedení tepla a svár je vyhříván hlavně ve středové linii. To je dáno dobrou tepelnou vodivostí okolních dílů. Bohužel i tak dochází k velkému zahřátí a rapidně tak klesá pevnost materiálu, jak již bylo uvedeno dříve. Na předchozím obrázku je zobrazen stav starší svorky, která je, oproti nové svorce na tom hůře. Jde o bod, kdy je rezistivita sváru zvýšena 2800krát oproti normálnímu stavu. Celkové tabulky výpočtu modelů pro všechny průběhy a všechny zjišťované veličiny jsou vidět v Příloze 6. a 7.

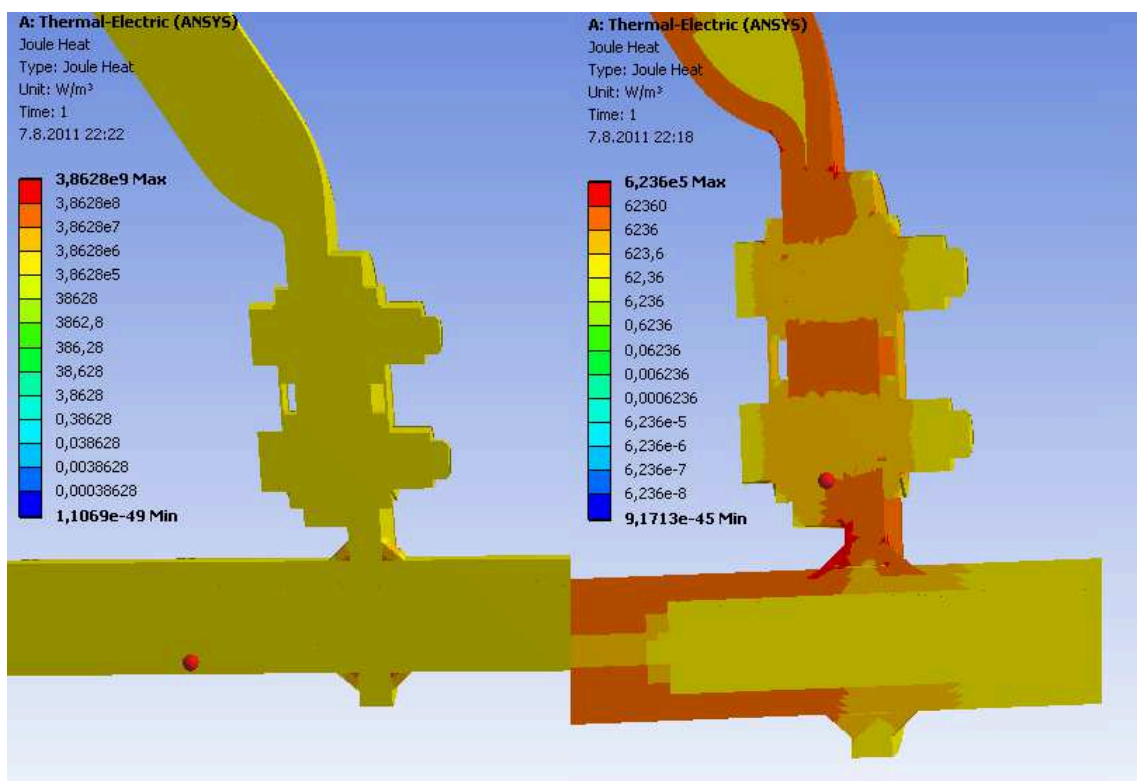
Ještě jsou ukázány hodnoty jouleovy ztráty v oblasti svárů a jeho okolí pro obě svorky. Zde je voleno logaritmické měřítko, aby ztráty byly lépe viditelné. Rozdíl ztrát z běžného provozu a ztrát při zhoršených parametrech dělá matematicky až čtyři desetinná

místa. Samozřejmě jde o maximální nalezenou hodnotu, kde rozdíl průměru je menší, protože svár tvoří jen lokální maximum oproti celému objemu svorky.



Obr. 94 Jouleovy ztráty na staré svorce (levá strana - zhoršená, pravá strana - normální stav)

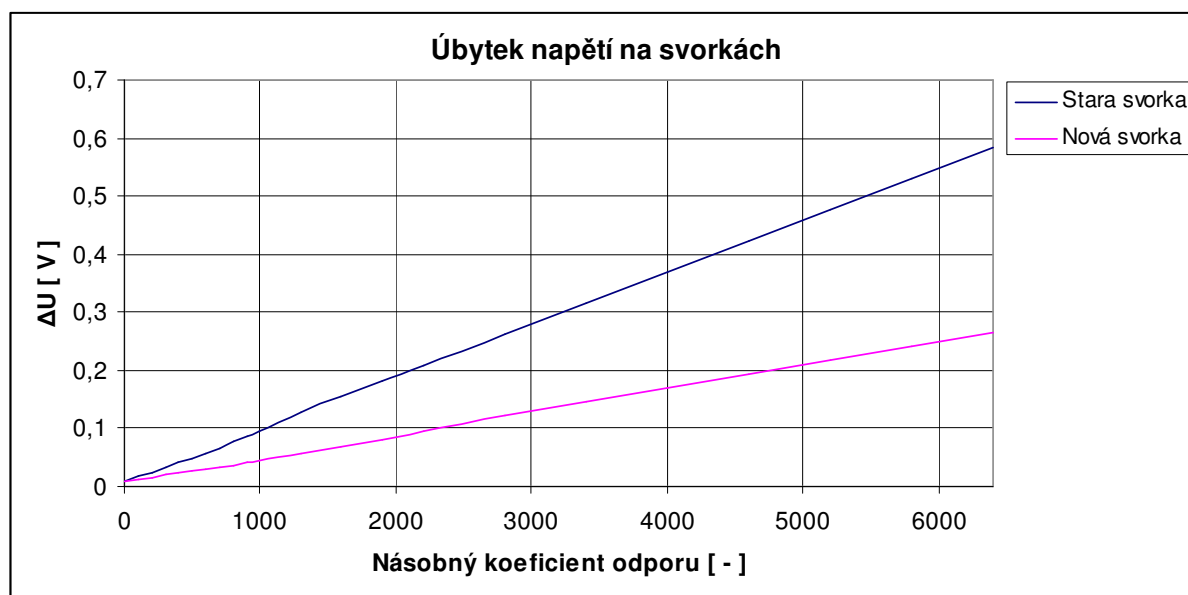
Z obrázku je také patrné, že při horších podmínkách ztráty v okolí splynou a svár vyniká. V oblasti svárů jsou maximální nalezené ztráty u staré svorky na hodnotě  $4,5 \cdot 10^9 \text{ Wm}^3$  a u nové svorky je vypočtená hodnota  $3,9 \cdot 10^9 \text{ Wm}^3$ .



Obr. 95 Jouleovy ztráty na nové svorce (levá strana - zhoršená, pravá strana - normální stav)



Poslední veličiny, kterým budeme v těchto simulacích věnovat pozornost je proudová hustota a úbytek napětí. Začneme úbytkem napětí, ten je zobrazen na následujícím grafu Obr. 96. Body pro stanovení úbytku napětí jsou ukázány na Obr. 84 v kapitole 7.2.1. Je vidět, jak rozdílné jsou jeho hodnoty pro obě svorky. Z těchto výsledků se také potvrzuje, že nová svorka je na tom lépe, protože rozdíl maximálního úbytku napětí nám dělá cca 0,3 V. Je to dáno také tím, že u staré svorky je změna teploty větší, než u svorky nové, a proto se může více projevovat kladný koeficient odporu. Dále k tomu přispívá objemový rozdíl svárů obou svorek.

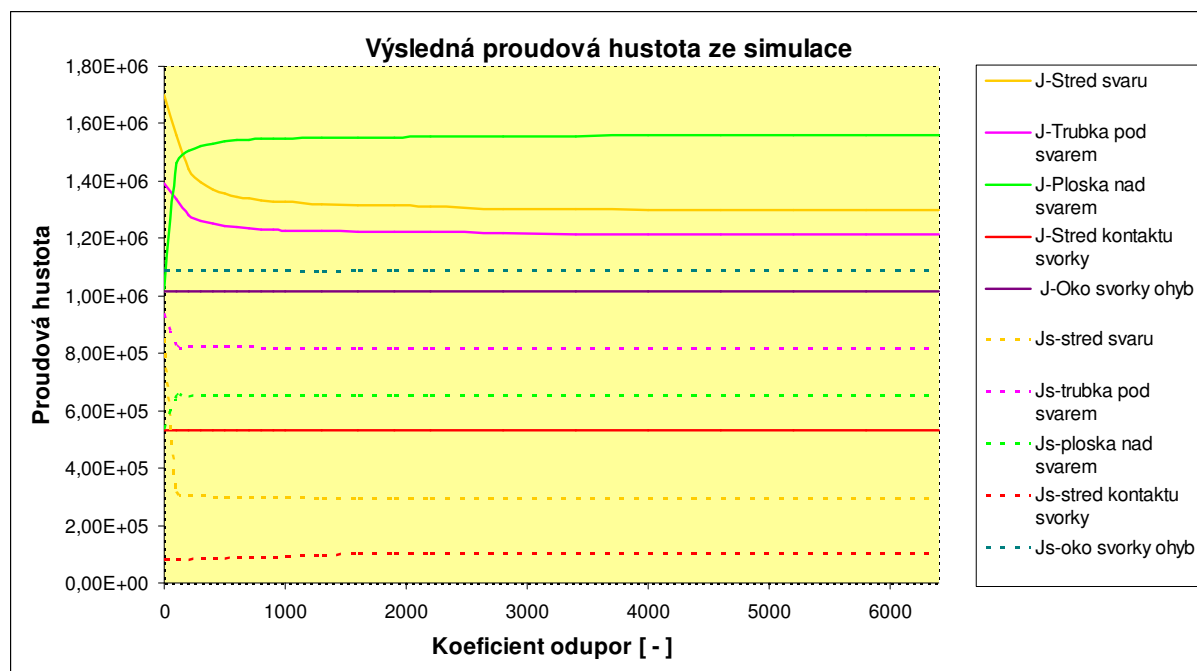


Obr. 96 Úbytek napětí na obou svorkách

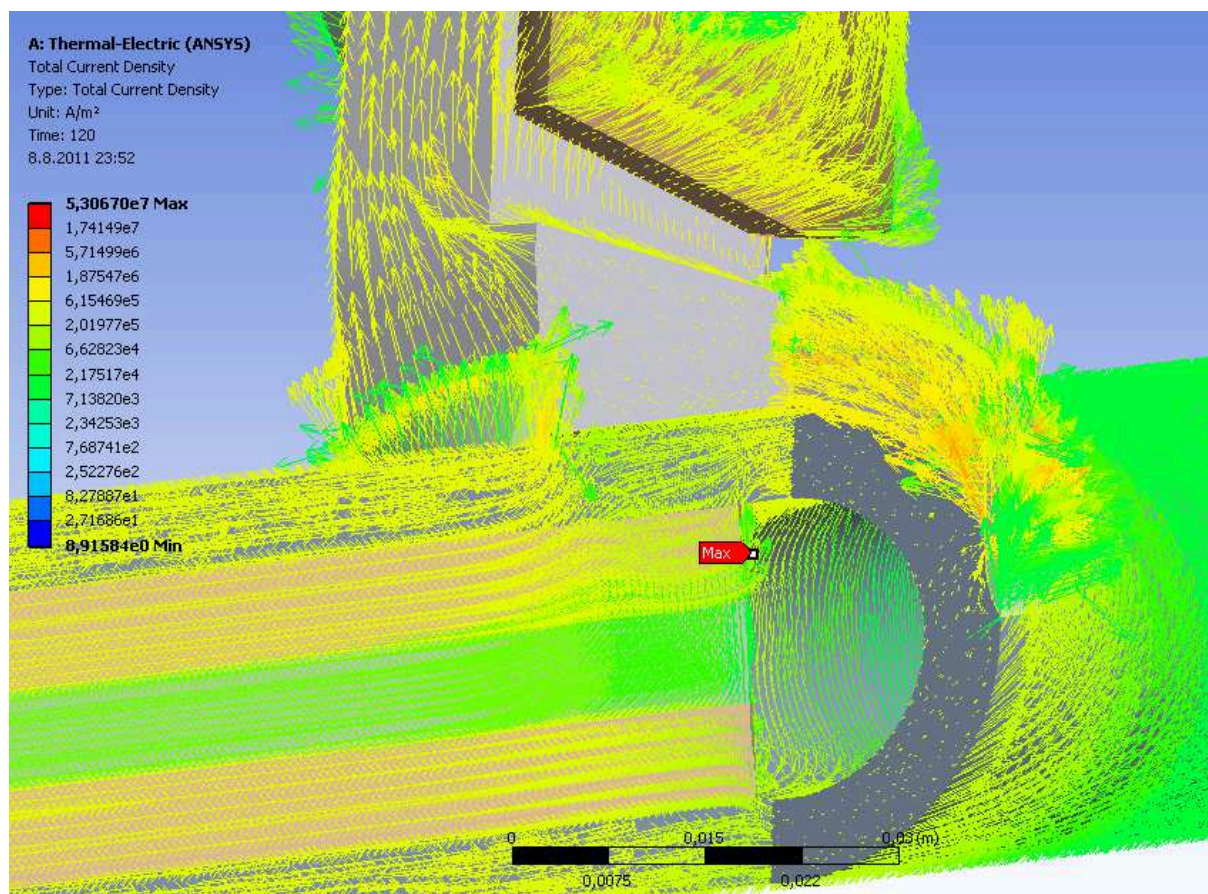
Tento úbytek napětí respektuje jen úbytek na samotné svorce, je vynechán úbytek na přechodových odporech zalisovaných lan a úbytek na přechodovém odporu kontaktní plochy šroubového spojení dvou částí svorek. Je předpoklad, že v praktickém provozu jsou přidávány i výše jmenované úbytky, a proto v extrémní situaci může být na svorce celkový úbytek ještě vyšší hodnoty.

K závěru této kapitoly je ukázán graf Obr. 97 pro proudovou hustotu, kde je znázorněna proudová hustota v kontrolních bodech. Jde o výslednou proudovou hustotu a jednotlivé složky pro směry x,y,z jsou v Příloze 6. a 7. Na grafu jsou zobrazeny hodnoty pro starou a novou svorku. Stará svorka má průběhy přerušovanou čarou a název průběhu začíná Js. Tyto křivky mají různé počátky, ale jejich většina je pak téměř lineární, dochází zde jen k malému pohybu hodnot. Jelikož svorky nejsou totožné, je těžké porovnávat proudovou hustotu v jednotlivých bodech a je vidět, že proudová cesta je u obou rozdílná. Pro zobrazení proudové cesty jsou zařazeny dva poslední obrázky v této kapitole, ukazují vektorové zobrazení proudové hustoty pro oba typy svorek. U nové svorky jde o stav kdy je násobný koeficient odporu 4600 a tepelné vodivosti 0,046, u staré svorky jsou hodnoty 2800 a 0,046.

Tyto simulace nám mají ukázat vliv kvality svárů na provoz svorek a mohou nám pomoci určit mezní hodnoty. Hodnoty, které byly nastaveny nemají přímo reprezentovat homogenní změnu sváru, ale mají ukázat, o kolik se může změnit svár jako celek, aby dokázal přenášet požadovaný proud. Tyto změny můžeme chápat jako zmenšení účinného objemu svárů vlivem chemických procesů, vlivem mechanických procesů nebo dalších degradačních událostí.

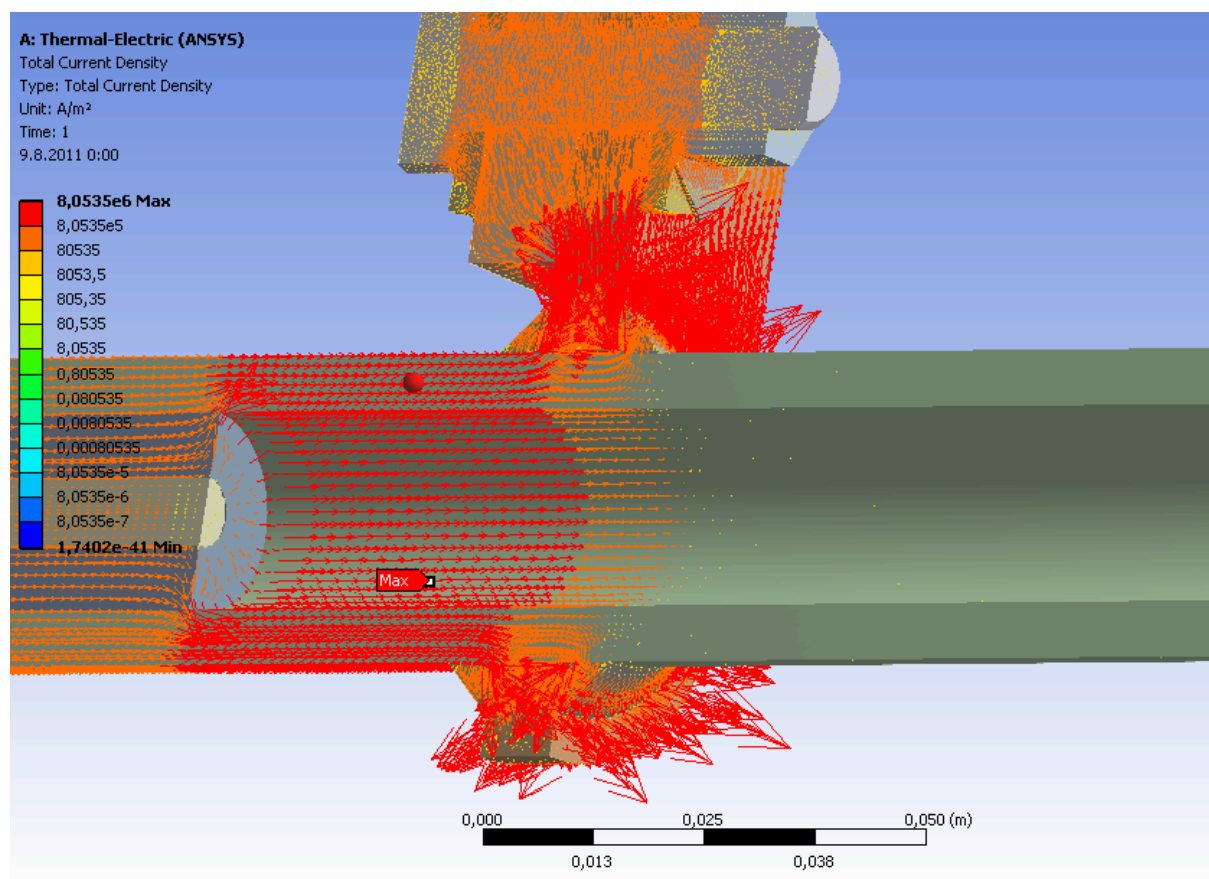


Obr. 97 Výsledná proudová hustota



Obr. 98 Vektorové zobrazení proudové hustoty, pro starou svorku, při snížených parametrech





Obr. 99 Vektorové zobrazení proudové hustoty nové svorky při snížených parametrech

### 7.3 MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLIVŮ NA SVORKY

Po proudovém zatěžování se podíváme na chování mechanických svorek při mechanickém zatěžování. Tyto simulace nám mají ukázat nejstěžejnější místa na svorkách, která jsou nejvíce namáhána, nebo kde může docházet k minimalistickému vzdalování kontaktních ploch a tím k možnému vniku znečišťujících částic do kontaktního systému. Mechanické namáhání bylo simulováno jako působení sil v několika směrech. Uložení svorek je definováno ve stejném smyslu jako je jejich standardní pracovní poloha.

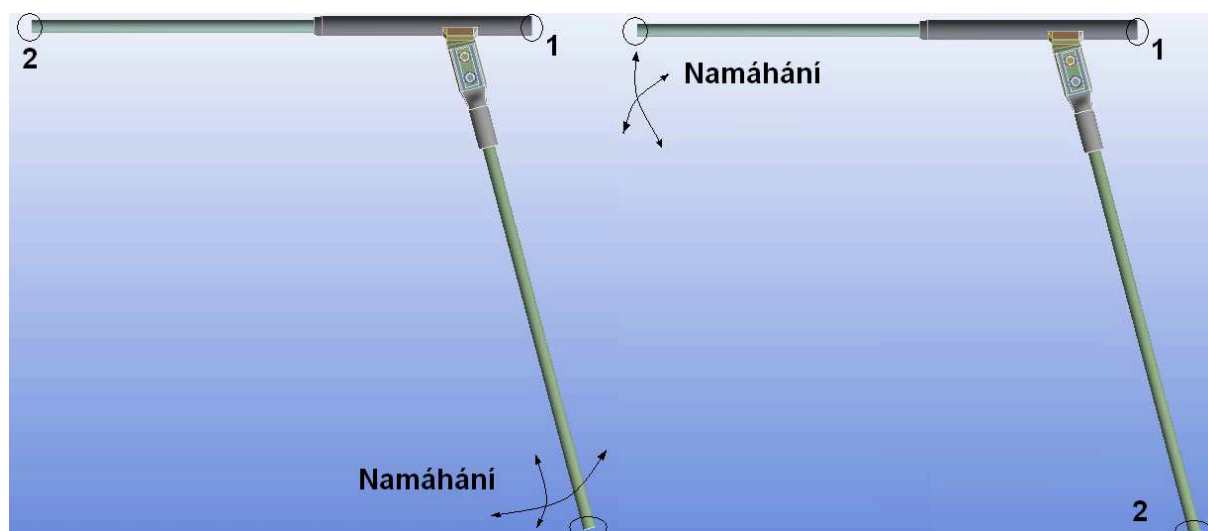
Před započítím simulací jsme museli definovat několik podmínek, které jsou nutné k jejímu správnému provedení. Tyto podmínky vychází z konstrukčního provedení svorky. Hlavní nastavené podmínky jsou tyto:

- působící síla (definovaná jako vektor působící síly)
- podpěrné a pevné body (simuluje uchycení svorky na stožáru)
- předepnutí šroubů (síla, kterou šroub svírá)
- třecí plochy a vzdálené plochy (jsou definované oddálení a koeficientem smykového tření.)
- působení gravitační síly (dle uložení svorky v pracovní poloze)

Celkové objemové a materiálové provedení zůstalo stejné jako u předchozích simulací. Mění se jen fyzikální vlastnosti použitých materiálů, které musí být definovány v simulačním programu. Tyto zde nebudou jmenovány a je možné je vyčíst z materiálové knihovny programu Ansys Workbench. V této simulaci jsou opět použity materiály „structural steel“ a

„aluminum alloy“.

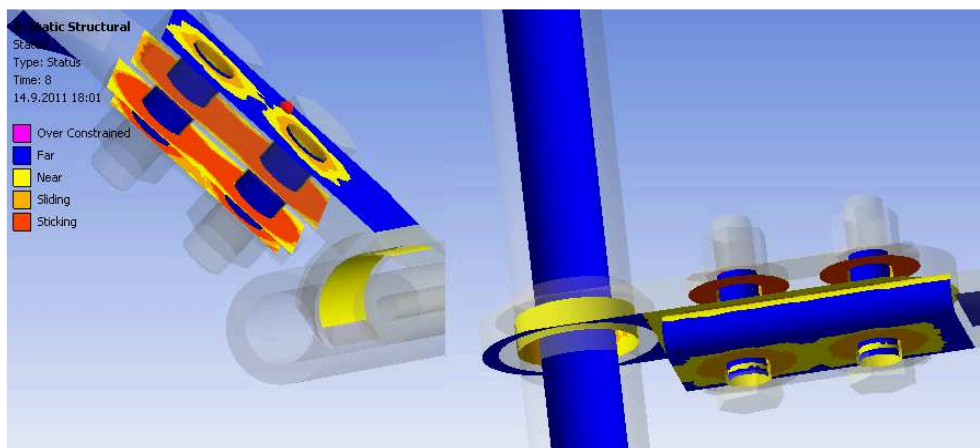
Ted' bude ukázáno, jak byly nastaveny pro jednotlivé výše uvedené podmínky, jejich hodnoty a možnosti. Nejdříve si ukážeme **zvolené uchycení svorky**, tedy pevné body, které byly zvoleny u obou typů svorek ve stejném smyslu. Uchycení je nastaveno tak, že máme dva pevné body. První je umístěn v oblasti uchycení svorky na izolátor a ten zůstává stálý. Druhý bod uchycení se mění a vychází s možností provozního namáhání. První možnost je, že svorka je namáhána ze strany šroubového spoje pomocí lana, které je na spodní straně nalisováno do svorky. Pak je pevný bod na konci druhého nalisované lana v rovině prvního pevného bodu. Druhá možnost je, že namáhání je v obráceném smyslu od druhého lana a pevný bod je zvolen na konci lana od spodního šroubovaného oka. Vizualizaci můžete vidět na následujícím obrázku Obr. 100.



Obr. 100 Pevné body uchycení a namáhání svorek (Levá část - první možnost, Pravá část - druhá možnost)

Čísla na obrázku odpovídají číslům pevných bodů. Nalisování lan bereme jako pevné spojení, ve smyslu svaření. Je to proto, že z praxe bylo ukázáno, že část problémů se samozřejmě nachází v lisovaných spojkách, ale tyto simulace se mají soustředit na ostatní problémy.

U tečných a **třecích ploch** je potřeba dodefinovat koeficient smykového tření a popřípadě oddálení povrchů. Koeficient smykového tření je rozdílný pro různé materiály a pro rozdílnou úpravu povrchu v místě styku.



Obr. 101 Třecí a kontaktní plochy

Pro tyto simulace byly voleny dvě hodnoty, protože existují na modelu jen dva druhy styků. První je „hliníková slitina“ s „hliníkovou slitinou“ se zvolenou hodnotou koeficientu 1,35 a druhý je styk hliníkové slitiny s konstrukční ocelí s koeficientem voleným 0,9. U volby koeficientu bylo vycházeno z [36]. Dále pak bylo dodefinováno oddálení, které se zadává u malých mezer např. v okolí šroubu v otvoru šroubu. Výpis kontaktních ploch je zadán v každé simulaci a můžeme ho vidět Příloze 8,9,10 a 11, kde jsou jednotlivé simulace. Jednotlivé kontaktní plochy pak můžeme vidět na Obr. 101. Zde jsou zobrazeny kontaktní plochy pro obě svorky. Levá část obrázku ukazuje šroubový spoj s kontaktními plochami pro starou svorku a pravá strana ukazuje obdobně novou svorku. Vyhodnocení vzdálenosti je zobrazeno barevnou škálou od modré po červenou. Modrá barva značí plochu bez kontaktu a na druhé straně červená zvýrazňuje třecí kontakt. S obrázku je pak patrné, že předeptnutí šroubů zajišťuje dostatečnou kontaktní plochu.

**Gravitační síla**, je definována dle Obr. 100 směrem od vrchu dolů bez natočení do stran. Ve skutečnosti může být svorka o malý zanedbatelný uhel natočena kolem bodu jedna směrem dolů. Toto natočení zanedbáváme. Toto natočení respektuje průhyb horizontálního lana.

**Předeptnutí šroubů** definujeme jako sílu, která působí mezi matkou a hlavou šroubu a drží sešroubované plochy u sebe. Její působení je směrem od matky a hlavy šroubu do středu vzdálenosti svěrných ploch po ose šroubu. Hodnotu této síly ovlivňuje materiál a velikost šroubu a matky, jejich vzájemné dotažení a další věci viz [37]. Velikost můžeme také ovlivnit použitím různých druhů podložek a mazání závitu při dotahování atd. Pro naše simulace byly nastaveny dvě konstantní hodnoty dle [38], [39]. Hodnoty byly vybrány s úvahou, že řešíme nejhorší situace, a proto materiál šroubu a matky byl zvolen z horší kategorie 5.6. Dle tohoto materiálu byly zvoleny již zmíněné síly. Máme dva průměry šroubu 12 mm a 16 mm, kde větší průměr je použit pro starší svorku.

- pro starší svorku je síla volená 40 kN
- pro mladší svorku je síla volená 25 kN

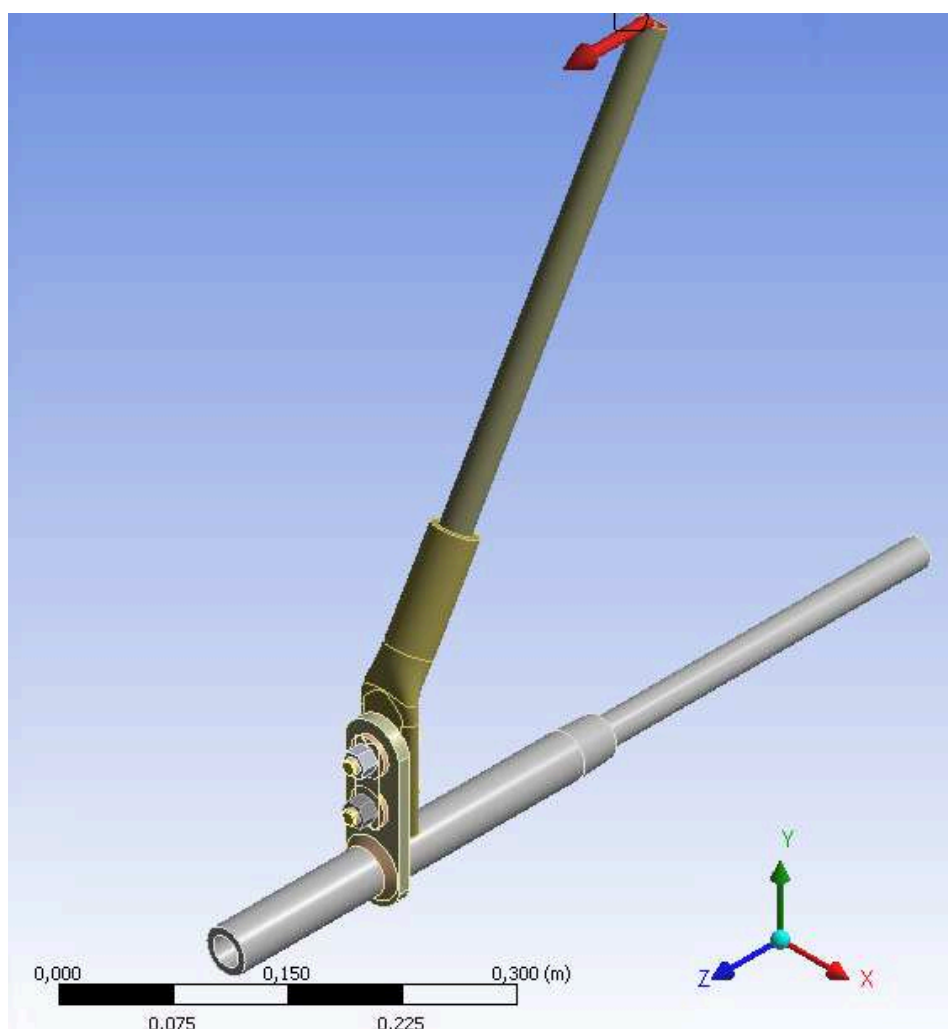
V simulacích je pro šrouby a matky volen materiál „structural steel“ což zřejmě kvalitativně neodpovídá parametrům zvoleného materiálu 5.6. Materiál v simulacích má oproti materiálu ve skutečnosti parametry horší, a proto bude v simulacích vykazovat větší namáhání. Na tuto věc byl při vyhodnocování brán zřetel.

Poslední co je potřeba doplnit k následujícím simulacím je zvolené namáhání a jeho hodnoty. Jak bylo již naznačeno v odstavci věnujícímu se zvolenému uchycení svorek, jsou svorky namáhány dvěma způsoby dle Obr. 100. Vždy jsou dva pevné body a jeden bod, ve kterém **působí síla**. Vektor této síly se pak mění dle zadaných podmínek. Zadané hodnoty vychází z následující tabulky.

Tab. 17 Zatěžovací síly

Případ	1.	X[N]	Y[N]	Z[N]	Případ	2.	X[N]	Y[N]	Z[N]
Čas [s]	1	0	0	300	Čas [s]	1	0	300	0
	2	0	50	-300		2	0	-300	50
	3	150	100	0		3	150	0	100
	4	-150	150	0		4	-150	0	150
	5	100	200	100		5	100	100	200
	6	100	150	-100		6	100	-100	150
	7	-100	100	-100		7	-100	-100	100
	8	-100	30	100		8	-100	100	30

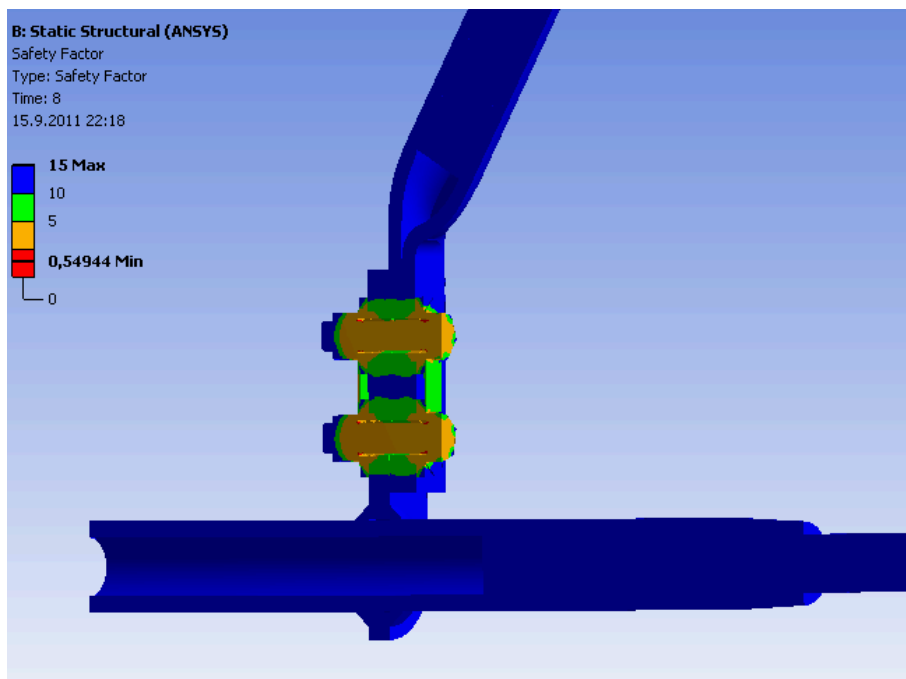
Hodnoty v tabulce jsou dány tak, aby svorka vždy byla zatěžována v reálných směrech. Velikost síly byla odhadnuta a měla by simulovat působení větru, námrazy, dilatace a dalších vlivů, které způsobují pohyb vodiče. Důležitým účelem této simulace je vzájemné porovnání obou druhů svorek. Výchozí stav je bez působící síly a hodnoty v tabulce pak ukazují složky vektoru síly, který působí na vodič v definovaném místě. Působící síla se pak mění dle uvedených kroků. Na závěr této části ukážu, jak je model umístěn do souřadného systému, aby bylo snazší si představit směr působení sil. Toto je zobrazeno na následující obrázku Obr. 102. Obrázek ukazuje první případ zatěžování svorky a to přímo krok číslo jedna. Orientace obou svorek v prostoru je stejná a pro porovnání byly síly ponechány stejné. Pro co největší vyrovnání působícího momentu je délka vlisovaných vodičů u obou svorek stejná. Přesněji délka vodičů od konce svorky do konce vodiče.



**Obr. 102** Uložení svorky v souřadnicovém prostoru je stejné pro oba typy. Zobrazena je nová svorka

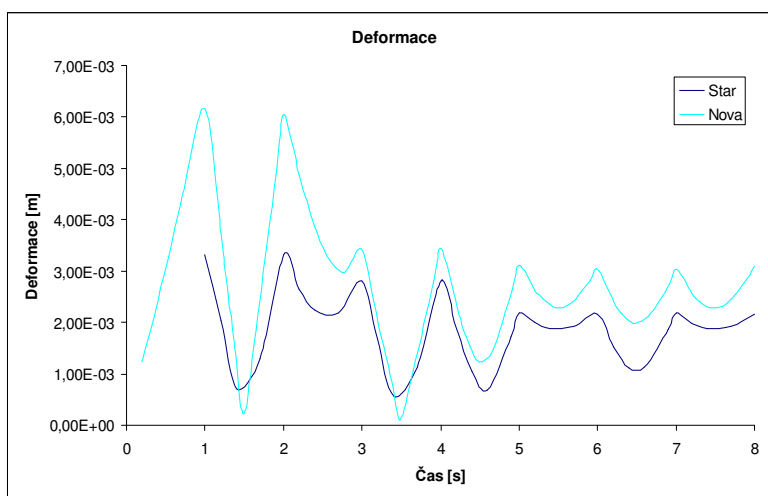
Následující odstavce se již budou věnovat vyhodnocení výše popisovaných simulací. První začneme trochu obráceně, „Případem 2.“ dle Tab. 17, Tab. 17a ukážeme si výsledky simulací pro obě svorky. Je to případ, kdy dochází ke kývání vodiče kolem horizontální osy. Pro vyhodnocení použijeme stejný systém bodů jako v kapitole 7.2.1 na Obr. 84. Musím říci, že tyto simulace ukazují to, že tento systém mechanického zatěžování zvládají oba dva druhy svorek. Ze simulací je vidět, že nejvíce jsou mechanicky zatěžovány šrouby ve šroubovém spoji. To nám ukazuje na důležitost kvalitních materiálů pro šroubový spoj a jeho dobré utažení. Při nedostatečném dotažení dochází k pohybu v kontaktní ploše a přechodový odpor

je značný a zvětšuje se zanášením nečistot a vlivem atmosférických podmínek. Při přetažení šroubového spoje pak dochází k nadměrnému zatěžování šroubů a každý vnější pohyb se jejich zatěžování ještě více zvyšuje. Pro ukázkou přidávám zobrazení vypočteného bezpečnostního faktoru na konci zatěžovacího cyklu. Tato simulace je zkrácena použitím horšího materiálu pro šroubové spoje, ale v podstatě nám ukazuje jak se může projevit záměna méně kvalitních šroubů oproti šroubům doporučeným nebo dodávaným výrobcem.



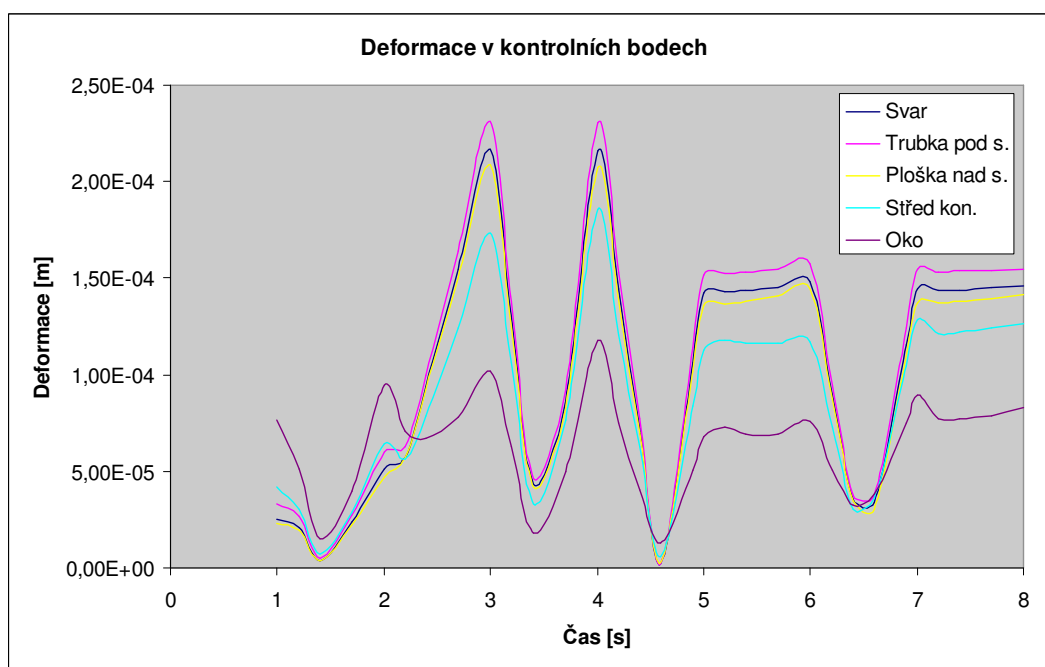
Obr. 103 Bezpečnostní faktor pro druhý zatěžovací případ

Na předcházejícím obrázku je zobrazen výstup ze simulace na nové svorce, ale stará svorka má výsledky velice podobné. Celé simulace jsou přidány jako Příloha 10. a 11. Další co si ukážeme jsou vypočtené hodnoty v kontrolních bodech pro deformaci a napětí. První zmiňme hodnoty deformace v kontrolních bodech, jsou zobrazeny na Obr. 105 a následujícím. Obr. 105 ukazuje vypočtené hodnoty deformací pro starou svorku a následující graf pak pro svorku novou.

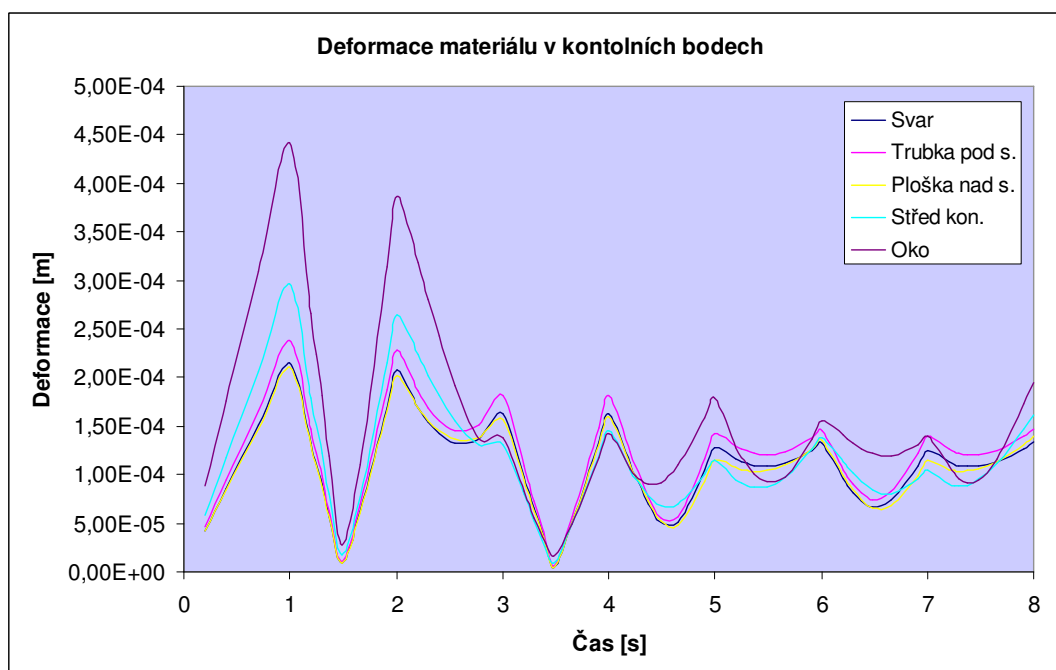


Obr. 104 Maximální deformace pro obě svorky při druhém případě zatěžování

Můžeme říci, že hodnota deformace je u obou svorek podobná, její průměr se drží okolo hodnoty  $1 \times 10^{-4}$  m. U staré svorky je průměr o něco menší, což bude dáno zřejmě tím, že stará svorka má mohutnější vlastní tělo svorky. Na průbězích jsou vidět určité vrcholy, které potvrzují předchozí tvrzení. Od času 4 vteřiny se pak hodnoty stabilizují kolem hodnoty  $1,5 \times 10^{-4}$  m pro obě svorky. Je nutné také říci, že k největší deformaci nedochází v těchto bodech, ale v oblasti působení síly. Hodnoty deformace pak klesají se vzdáleností od místa působení. Maximální hodnoty deformací jsou zobrazeny na Obr. 104 a v podstatě se jedná o posun konců vodičů, kde působí síla.

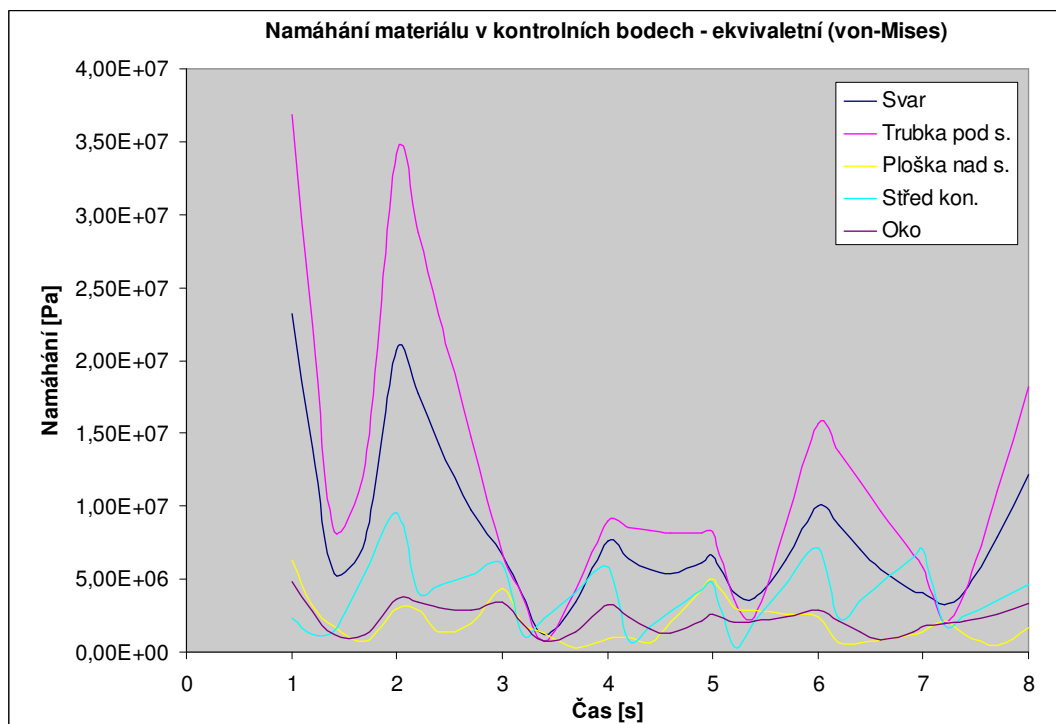


**Obr. 105** Hodnoty deformace vypočtené na staré svorce pro druhý případ zatěžování

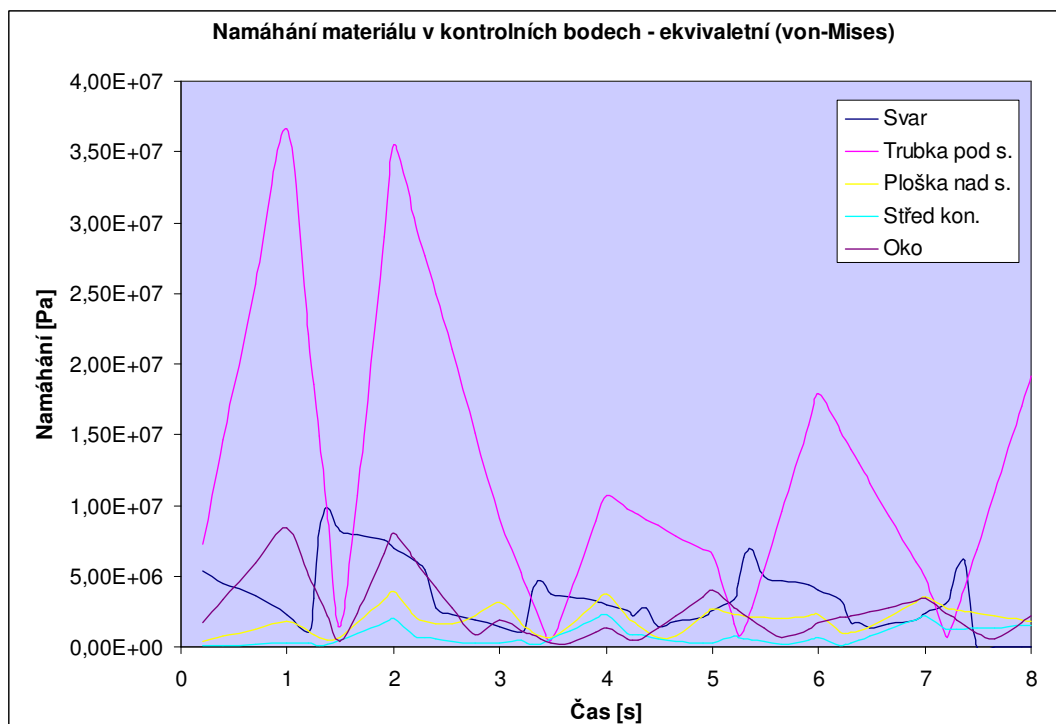


**Obr. 106** Hodnoty vypočtené deformace na nové svorce pro druhý případ zatěžování

Z předchozích zobrazených výsledků simulací pro deformaci, při druhém případě zatěžování, jsem nezjistil žádné zvláštní chování svorek. Další co bude ukázáno z výsledků simulací jsou hodnoty namáhání pro druhý případ zatěžování. Výsledné grafy jsou ukázány na následujících dvou obrázcích.



Obr. 107 Namáhání v kontrolních bodech u staré svorky

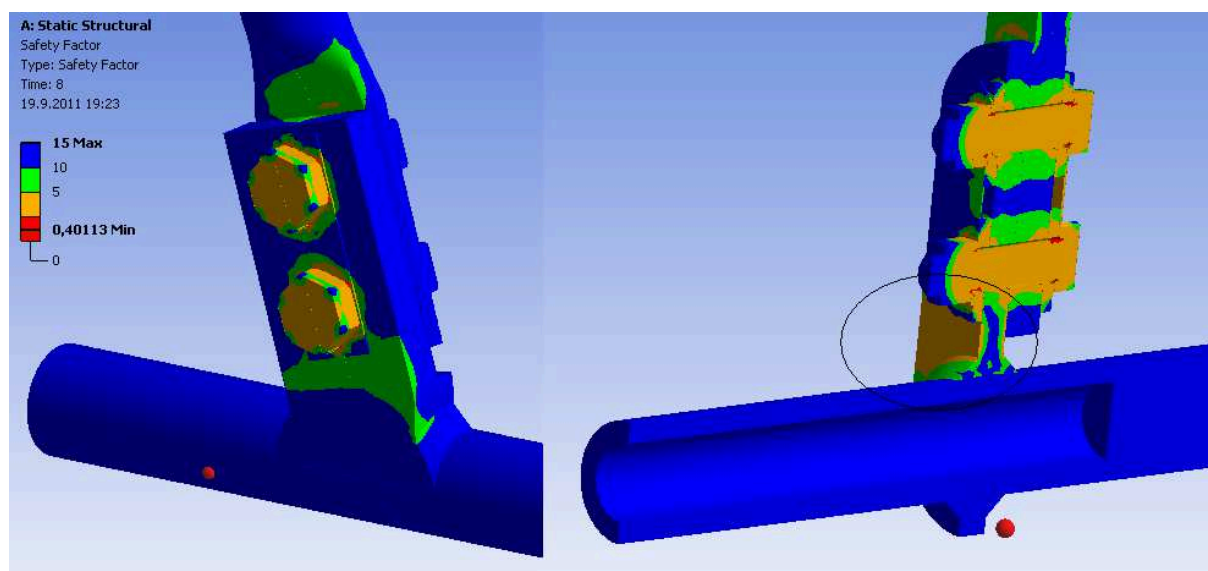


Obr. 108 Namáhání v kontrolních bodech u nové svorky



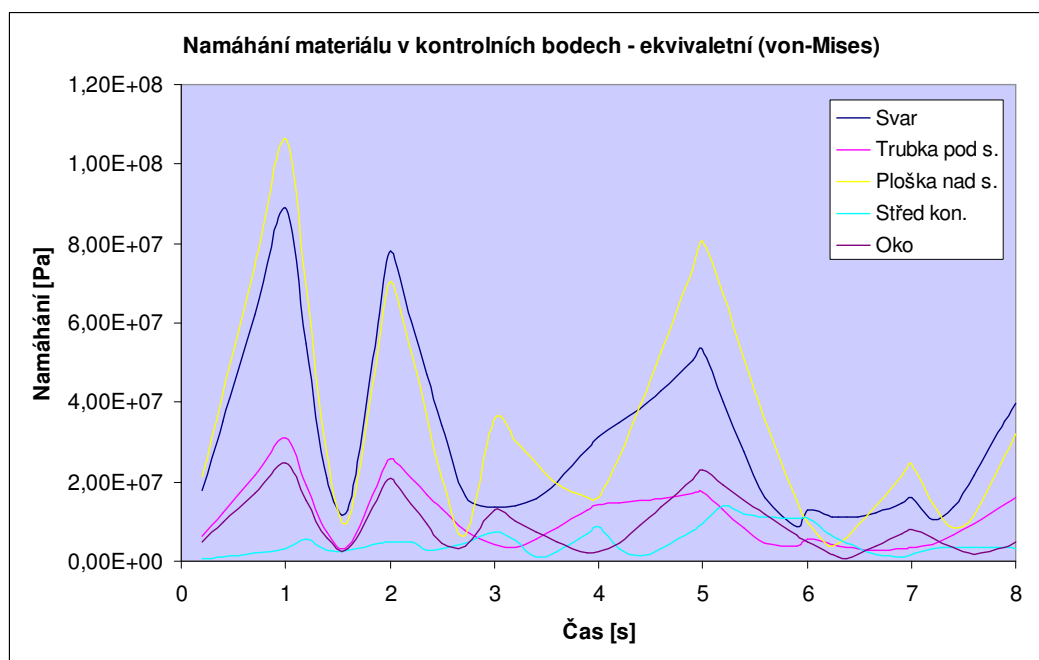
U zobrazených grafů namáhání je vidět, že svorky jsou ve výsledcích v podstatě totožné a při zatěžování je průběh napětí velice podobný. Maximální hodnoty dosahují velikosti kolem  $3,5 \times 10^7$  Pa. Výsledky testů z těchto simulací potvrdili, že oba dva druhy svorek, bez větších problémů zvládají tento druh zatěžování. Také ukázaly, že velice důležitou součástí, na kterou musí být brán zřetel jsou šrouby.

Nyní se podívejme co se děje se svorkami, pokud je budeme zatěžovat silou dle případu 1. viz. Tab. 17. Při tomto případě namáhání svorek obě svorky vykazují větší napětí, snížil se viditelně bezpečnostní faktor, který ukazuje poměr aktuálního namáhání k maximálnímu dovolenému namáhání. Na následujícím obrázku můžete vidět, že nová svorka (na obrázku vpravo) je více namáhána v části mezi svárem a šroubovým spojem (viz elipsa). U staré svorky se také projevuje oblast se sníženým bezpečnostním faktorem, ale je na tom o poznání lépe než svorka nová. Je to pravděpodobně dáno tím, jak už bylo dříve zmíněno, že stará svorka má mohutnější tělo oproti svorce nové. Ze simulací je opět vidět, že šroubový spoje je stěžejní částí svorky a jeho provedení velice ovlivňuje životnost svorky.

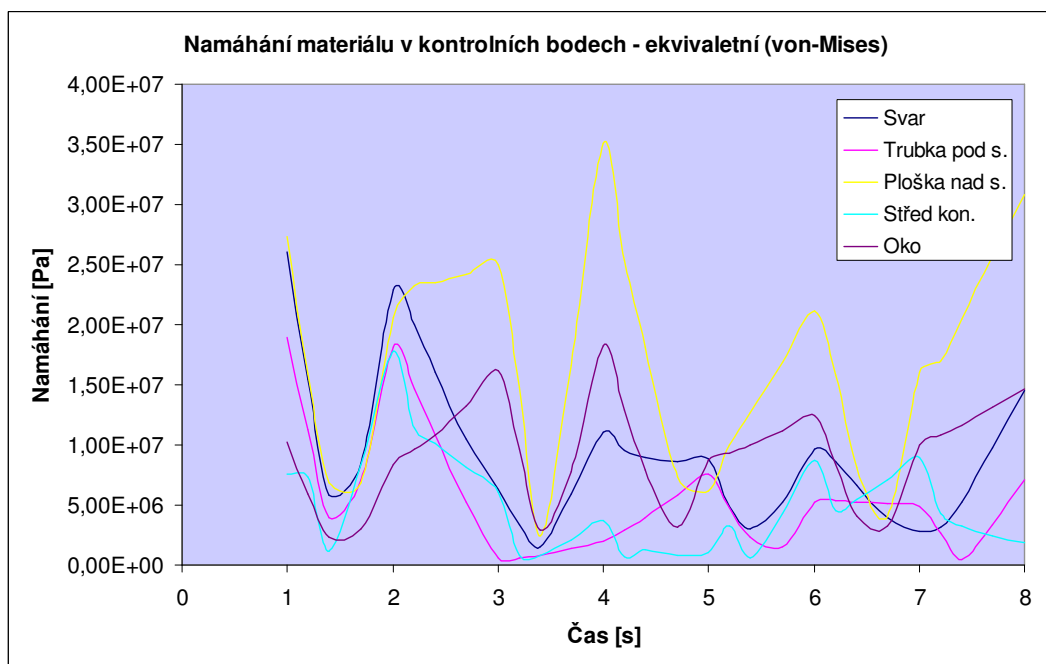


**Obr. 109 Bezpečnostní faktor pro obě svorky při prvním případě zatěžování**

Pokud jde o vypočtené hodnoty, ty jsou zobrazeny v následujících dvou grafech. Jde o hodnoty v již dříve používaných kontrolních bodech. První pohled nám ukazuje rozdíl maximálních hodnot pro novou a starou svorku. V obou případech vystupují hodnoty na oku, které je nejbližší namáhané části. Důležité také je se podívat, že pokud jsou svorky zatěžovány v ose z, kladným i záporným směrem, objevuje se zvýšená hodnota napětí i na sváru. Toto nám ukazuje úsek hodnot pro čas 1 – 3 vteřiny. U nové svorky se ztenčení profilů ve směru osy z projevuje tak, že křivka kontrolního bodu na sváru skoro kopíruje hodnoty na oku. Na zatěžování ve směru osy x každá svorka reaguje trochu jinak. U staré svorky jde o výraznou hodnotu kolem času 4 vteřiny. Toto je způsobeno tím, že stará svorka je zatěžována ve směru zúžení těla na jejím oku. U nové svorky je toto kompenzováno otočením oka o  $90^\circ$ . U nového provedení se více projevuje zatěžování v ose úhlu x a z. To ukazuje hodnota kolem času 5 vteřin. Celkově je vidět, že starší svorka mechanicky odolává lépe, což lze odvodit z menších hodnot napětí a ustálenějšímu průběhu veličin. U nové svorky jsou hodnoty špiček kolem  $1 \times 10^8$  Pa a u staré svorky se špičky zastavují u hodnot  $3,5 \times 10^7$  Pa. Pro porovnání ještě musím zmínit, že průměrné hodnoty ve sváru a oku staré svorky se rovnají a mají hodnotu  $9 \times 10^6$  Pa, kdežto u nové svorky je v kontrolním bodě na oku průměr  $9,7 \times 10^6$  Pa a ve sváru je hodnota průměru  $3 \times 10^7$  Pa. Toto nám u nové svorky značí větší namáhání sváru.

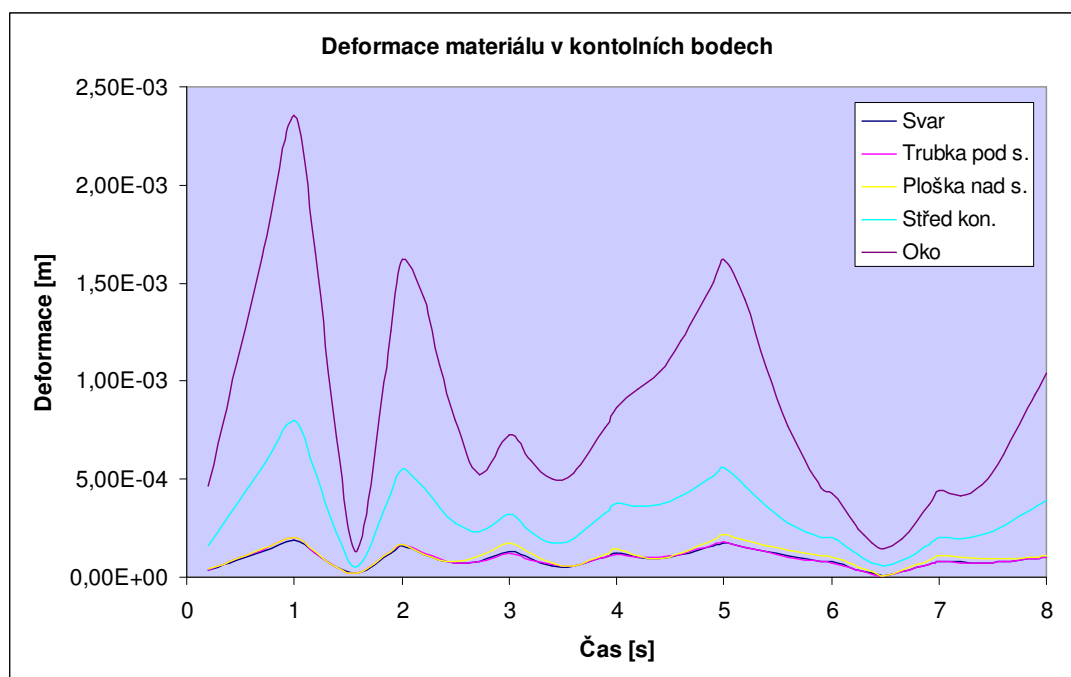


Obr. 110 Namáhání nové svorky prvním případem zatěžování

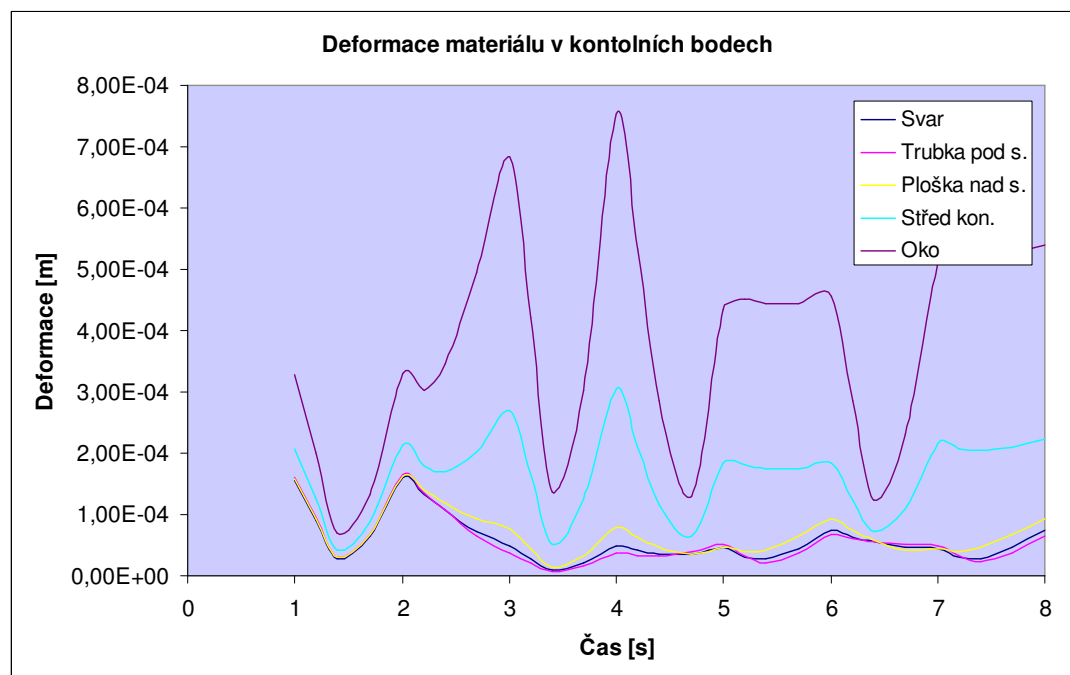


Obr. 111 Namáhání staré svorky prvním případem zatěžování

Pokud jde o kompletní výsledky simulací jsou uloženy jako Příloha 8. a 9.. Pokud jde o deformace, které se projevují na svorkách, pak můžeme říci, že jejich hodnoty kopírují průběhy napětí. Největší hodnoty se však projevují u kontrolního bodu ve sváru a to u obou svorek. Přesný průběh můžete vidět na následujících dvou grafech. Z grafu je ještě lépe patrné jak je každá svorka lépe adaptovaná na jiný směr namáhání. Nové svorce dělá problém namáhání v z souřadnicích a staré v x souřadnicích. Je to dáno pootočením šroubového mechanismu. Tyto výsledky také potvrzují lepší mechanickou odolnost staré svorky.



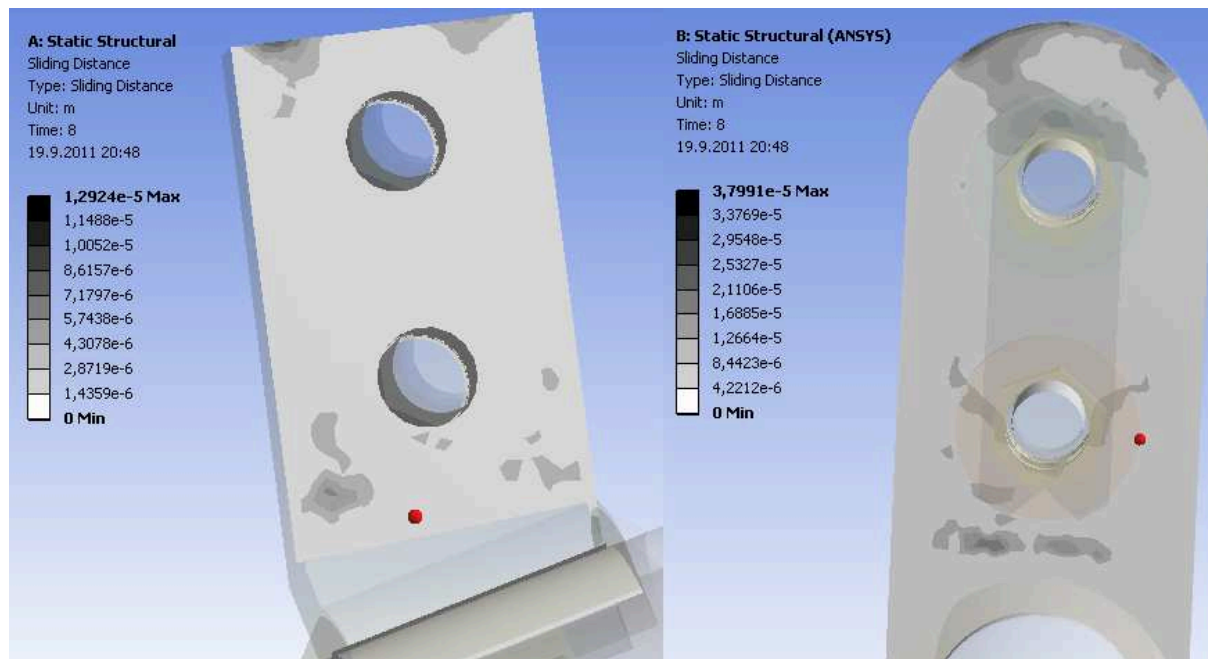
Obr. 112 Deformace při namáhání prvním případem pro novou svorku



Obr. 113 Deformace při namáhání prvním případem pro starou svorku

Poslední na co se u výsledků podíváme je pohyb elementů v hlavní kontaktní ploše systémů svorky. Tuto plochu tvoří kontaktní styk dvou částí svorky, které jsou k sobě vázány šrouby. Z předchozích výsledků se již dá tušit, která svorka dopadne hůře. U nové svorky, kde již předchozí výsledky deformací a napětí potvrzují větší tendenci k pohybu, jsou výsledky znatelně horší. Následující obrázek ukazuje zobrazené plochy, kde dochází k pohybu. Časté opakování zatěžovacích cyklů pak může způsobit, že kontaktní plocha se vlivem opotřebení zmenšuje a zvyšuje se přechodový odpor daného spoje. Nejhorší na svorky působí kombinované zatěžování ve směrech x a z. To má za následek mikropohyb v oblastech, které

jsou znatelně vidět v horní i dolní části obou zobrazených ploch. Starému provedení zřejmě při tomto zatěžování částečně pomáhá velká podložka, která je použita na jedné straně šroubového spoje. Částečně pak také může pomáhat použití větších šroubů, které umožňují použít větší svěrnou sílu. Celkový graf maximálního vypočteného mikropohybu můžete nalézt v přílohách pro obě svorky.



**Obr. 114 Kluzná vzdálenost na hlavní kontaktní ploše svorek (Vlevo – staré provedení, vpravo – nové provedení svorky)**

Pokud jde o vyhodnocení těchto mechanických simulací, tak tyto simulace nám ukázaly několik věcí. První věcí je důležitost kvality materiálů šroubového spoje a jeho dotažení. Další věcí je, že pokud jde o porovnání těchto dvou modelů svorky, pak mechanicky je na tom lépe svorka staršího provedení, které lépe obstála u obou typů zatěžování. Ze simulací je dobře patrné, jaký vliv má otočení šroubového mechanismu u obou svorek. Ukazuje se pak rozdílná odolnost vůči zatěžování v obou směrech. Můžeme tedy konstatovat, že pro svorky jsou nejnáročnější kombinované děje, kdy dochází k působení sil v horizontálním bočním směru a vertikální osovém směru svorky. Můžeme si to představit jako působení bočního větru a podélné dilatace, která má vliv má prodloužení AlFe lana ústícího do svorky. Dilataci způsobuje například změna teploty nebo námraza. Z těchto úvah dále plyne, že by bylo velice zajímavé se podívat jestli k poruchám svorek opravdu dochází na místech s většími výkyvy počasí, popřípadě teplot.

## 8 ZÁVĚR

### 8.1 SHRUTÍ PRÁCE

Původní záměr na začátku studia byl věnovat se praktické termodiagnostice. Byla úvaha sepsat manuál pro provádění měření v distribučních sítích, ale postupem času bylo zjištěno, že materiály na dobré úrovni dodávají již sami výrobci. Proto se disertační práce na konec zaměřila na řešení problémů, které jsou spojené s praktickou diagnostikou v terénu.

V práci jsem se snažil poukázat několik důležitých věcí, které se často objevují při měření. První důležitou věcí je dodržení podmínek stanovených výrobcem před měřením a při měření. Pokud totiž vynecháme například tepelnou aklimatizaci kamery, je začátek měření zatížen chybou, dokud nedojde k její tepelné stabilizaci. Dále je důležité, aby měřená soustava byla tepelně ustálená. Také nesmíme zapomínat, že přílišné proudění zvětšuje součinitel přestupu tepla do okolí, nebo třeba velká vlhkost atmosféry snižuje její propustnost. Některé tyto aspekty sice vnášejí poměrně malou chybu, ale musíme si uvědomit, že čím měříme menší teploty, tím více nám tyto vlivy mohou ovlivnit výsledky měření. Je možnost použití úpravných koeficientů, ale většinou se u jejich stanovení typuje a vnáší se další chyba, ba dokonce se někdy různé zdroje v těchto koeficientech liší. Proto zásadně doporučuji se těmito koeficientům vyhnout. Dalším důležitým aspektem, je nebrat termogram jako hotový po měření, ale je důležité jeho další zpracování. Jak se zmiňuji v kapitole 4.2 je měřený prostor takzvaně materiálově složitější a z toho vyplývá i emisivně složitější. Toto musí být upraveno v postprocessingu, aby v teplotním poli nebyly přechody, které se tam nemohou vyskytovat. Je nutné si uvědomit teplotní kontinuum. Toto můžeme definovat tak, že na termogramu se teplota může měnit skokem jenom na teplotu pozadí, popřípadě „vzduchu“. U spojených ploch musí teplota vždy teplotně navazovat. Nynější běžně používané kamery neumí automaticky volit emisivitu měřených ploch a pro přepočet při měření kamera používá vždy jednu emisivitu, a proto je nutné termogramy dále upravovat. Pokud by se toto podařilo odstranit odpadla by nutnost dalších úprav.

Tímto se dostávám k další důležité věci a tou je emisivita. Jde o stěžejní parametr pro bezkontaktní měření teplot. U tohoto parametru je důležité zmínit, že již při studiu v tabulkách, dodávaných výrobcem, dochází k nejasnostem. Hodnoty u některých kovů jsou uváděny rozdílně a to zvláště u kovů s nižší emisivitou. Příklad můžete vidět v kapitole 3.1. Pokud jde o jeho nastavení, dost často nastává další problém - znalost materiálů, které měříme a hodnoty, kterou musíme zvolit. U kovů s vyšší emisivitou při špatné volbě, kdy volíme emisivitu s rozdílem např. desetin, nedochází k tak velké chybě, jsou to řádově jednotky stupňů. Největší problém nastává s poklesem emisivity pod 0,5, kdy každá její změna už vyvolá významnou změnu teploty. Nejhorší je měření materiálů s emisivitou pod 0,2. U těchto materiálů je změna teploty s emisivitou už poměrně značná a zvyšuje se s měřenou teplotou. Této problematice se práce v věnuje v kapitolách 4.1. Je zde prakticky ukázáno, jaké rozdíly teploty jsou na měřených površích různých druhů kovů. Tato část se také věnuje další důležité věci a to je změna emisivity se stupněm oxidace povrchu. Podíváte-li se do této části zjistíte, že měření například duralu bezkontaktní metodou je velice obtížné. Rozdíl na měřené ploše z tohoto kovu, která měla teplotu něco málo pod 500 °C, má hodnoty až téměř 200°C. Proto si dovoluji tvrdit, že měření kovů s emisivitou pod 0,2 je tak obtížné, že bez referenčních štítků nebo barev ho zásadně nedoporučuji. Zde však nastává další problém, jak na měření bezkontaktní metodou v distribučních sítích, kde nedostáváme možnost často vypínat zařízení abychom nanášeli referenční barvu nebo štítek. U vysokého napětí je zhora nemožné, dle bezpečnostních předpisů, se přibližovat měřeným částem pod napětím bez speciálního vybavení, nebo to zamezuje ochrana polohou, kdy měřené objekty jsou umístěny v dostatečné výšce, aby nebylo možné se dotknout. Dovoluji si tvrdit, že měření hlinkových

součástí v distribučních sítích je značně nepřesné a často se stává, že problémy, které jsou indikovány ve výstupních protokolech, ve skutečnosti problémy nejsou. Jedním z výstupů této práce je doporučení, že u objektů měřených bezkontaktně, by se již při instalaci do soustavy, měly instalovat referenční štítky nebo aplikovat referenční barva, která pak výrazně zvýší přesnost měření. Další možností jak by se dalo zpřesnit měření, je statisticky vyhodnotit nejčastější hodnoty emisivity na měřených součástech a tuto používat jako vztažnou. Je velice pravděpodobné, že u stejných materiálů se stupeň oxidace bude měnit dle jejich stáří. Pokud tedy vyjdeme z tohoto údaje, pak by se mohla emisivita určovat přesněji například z funkce, kde nezávislá veličina by byla stáří objektu. Tato myšlenka však v této práci rozpracována není, ale mohla by sloužit jako výchozí pro další studium.

Další část práce se věnuje vyhodnocení termovizních protokolů z měření. Data z těchto protokolů byla převedena, vyříděna a nakonec statisticky zpracována. To vše bylo za účelem zjistit co nejvíce informací o závadách z oblasti vedení, distribučních trafostanic a rozvoden. Data jsou z let 2002 – 2009. V první podkapitole s označením 6.1 jsou rozebrána data z měření na distribučních trafostanicích. Kde jako nejproblémovější se jeví prvek pojistka, jsou zobrazeny statistický výsledky s průměrným, maximálním a minimálním počtem nalezených problémů na jedno měření DTS. Dále jsou výsledky ukázány dle provedení DTS, dle stupně oteplení a ještě je ukázáno, jak se měření liší dle dvou oblastí, kde bylo měření prováděno. Výsledky tohoto vyhodnocení by mohly sloužit jako zdroj informací o jednotlivých provedeních, jak se mění počet nalezených závad se stářím DTS a kde je potřeba zapracovat na úpravách, aby se odstranilo co nejvíce závad na problémových prvcích. Následující podkapitola obsahuje výsledky z měření na rozvodnách a vyhodnocení ukázalo, že nejproblémovější prvek na rozvodnách je odpojovač. Dále jsou ukázány nalezené závady dle napěťových hladin, počet kontrol na rozvodnách, počet kontrolovaných zařízení na rozvodu, počet zařízení dle napěťových hladin a další. Tyto výsledky jsou spíše statistickým vyhodnocení pro kontroly na rozvodnách, vypovídají o složitosti prováděných kontrol a ukazují počty nalezených závad dle rozvoden a dalších parametrů. Zde však na přání zdroje protokolů musely být některé informace zatajeny. Je však jasné, že pro autora protokolů, by toto vyhodnocení mohlo být velkým zdrojem informací o stavu jednotlivých rozvoden, zařízení a prvků. Poslední podkapitola s označením 6.3 se věnuje vedením. Zřetel je brán na nejproblémovější prvek, kterým je kotevní svorka. Informace z tohoto vyhodnocení sloužily jako zdroj pro další část práce. Nyní však ještě musím poznamenat, že při analýze bylo posouzeno, jak by měla vypadat tabulka dat z protokolů, která slouží jako výchozí prvek při statistickém zpracování. Tabulka by měla obsahovat toto:

- označení protokolu, ze kterého data pochází (dle značení zhotovitele protokolů)
- umístění měřeného objektu (např. název rozvodny, poloha GPS, nejbližší obec atd.)
- název měřeného objektu (jednoznačný a stejný pro všechny další stejné objekty např. vypínač)
- název prvku, na kterém byl nalezen problém (jednoznačný a stejný pro další objekty např. průchodka)
- stupeň oteplení (dle klasifikace)
- provedení objektu (určuje druh objektu např. venkovní)
- napěťová hladina (jednoznačně dle u nás používaných napěťových hladin)
- časové určení nalezení problémů (např. ve tvaru DDMMRR)
- stáří objektu (buď od instalace objektu nebo od výroby objektu)

Toto jsou hlavní údaje, které pak můžou vést na analýzy dle provedení, dle stáří, dle umístění,

dle prvkové problematiky atd. Je zřejmé, že vedení takové databáze je časově náročnější, ale myslím si, že výstupní dlouhodobá analýza může být pak velice hlubokým zdrojem informací.

Vraťme se ke kotevní svorce. Její problematika je řešena v poslední části práce. Při diskuzi s odborníky z praxe bylo potvrzeno, že výsledky ze zpracování části databáze, která řešila vedení, odpovídají zkušenostem z praxe. Bylo doporučeno, aby pozornost byla věnována právě této součástce. Provedl jsem proto mnoho simulací, které mají ukázat provozní schopnosti těchto svorek. Pro simulace byly zvoleny dva druhy stejného typu svorky. První druh je svorka staršího typu, která byla používána již dříve a druhý druh je současně používaný model. Prvním druhem testu byly základní provozní simulace, kdy svorky byly zatěžovány postupně zvětšujícím se proudem až k hodnotě jmenovitého proudu, viz kapitola 7.2.1. Zde se potvrdilo, že jejich konstrukční provedení je schopno bez problému zvládat jmenovité proudy, na které svorky byly navrženy. Z těchto simulací jsem si pak, dle výsledků, vytipoval některé další jevy, které je potřeba prozkoumat. Dále byl zájem směřován na sváry, ty jsou jako stěžejní část u obou svorek. Jejich špatné provedení může způsobit nesprávnou funkčnost celé svorky. Simulace byly zaměřeny na změnu odporu a změnu tepelné vodivosti těla svárů. Z výsledků dle kapitoly 7.2.2 mohu říci, že lépe vycházelo provedení nové, protože jeho sváry jsou objemově větší, a proto jejich částečné poškození má menší vliv na chod svorky. Toto poškození samozřejmě nemůžeme chápat jako poškození celého sváru, ale můžeme uvažovat, že částečné poškození zvedá odpor celé proudovodné cesty, což je simulováno právě změnou odporu. Z těchto simulací je také patrné, že děje, které vedou k totálnímu zničení nebudou jen jednoho druhu. Je zřejmé, že poškození bude mít i mechanický a chemický podtext. Svorka bude ovlivňována se stářím a zvětšujícími se přechodovými odpory. Mechanické namáhání zapříčiňuje pohyby součástí a možnost zanášení nečistot do kontaktních systémů, dále pak možnost vzniků trhlin nebo nevratného poškození materiálu. Toto bylo ověřeno v posledních částech simulace, kde bylo odzkoušeno, že každé provedení svorky jinak snáší silové namáhání, kterým na něho bylo působeno. Tyto testy dále ukázaly, že stěžejní je také šroubový systém, kdy při použití nevhodných šroubů může docházet k jejich přílišnému namáhání. Další věc je jejich dotahování. Přetažení způsobuje přílišné předepnutí šroubů a nedotažení pak kluzný pohyb ve spojích. Pokud jde o mechanické namáhání pak celkově vychází stará svorka lépe, protože nová svorka je objemově menší a má menší hmotu pro odolávání mechanickému namáhání. U nové svorky je nejhorší namáhání směry dle roviny souměrnosti a u staré jsou tyto nejhorší směry pootočený o 90 stupňů. Je otázkou, ze kterého směru častěji přichází namáhání. Ideální by bylo vyvinout svorku, která by dokázala odolat tomuto působení z obou směrů. U nové svorky byla tendence snižování proporcionálních rozměrů, což má za následek, již výše jmenované namáhání. U této svorky by zřejmě prospělo, kdyby plochá část s otvory pro přišroubování byla o něco kratší, aby se snížil působící moment a tím snížilo namáhání. Dále pro menší pohyby v oblasti šroubového spoje by bylo vhodné použít širokou ocelovou obdélníkovou podložku, jako u staré svorky. Ta by svornou silou mohla potlačovat pohyby v oblasti hlavního kontaktního systému.

## 8.2 SPLNĚNÍ DANÝCH CÍLŮ

Na úplný závěr této práce je potřeba zdůraznit jak se podařilo v práci vyplnit cíle, které byly definovány na začátku této práce.

- Řešení problematiky aplikace termovize v distribučních sítích s poukázáním na problémy, které byly nalezeny při praktickém měření.
- Celá kapitola 4 se věnuje problematice praktické termodiagnostiky. Je provedeno



upozornění na časté metodické chyby. Problematika se pak stáčí ke stěžejnímu problému emisivity a provádí i praktické ukázky na několika druzích kovů. Není dostatek času všechny problémy vyřešit, ale ukázat jaké problémy jsou nejčastěji spojeny s touto metodou měření. Myslím si, že se práce tomuto bodu dostatečně věnovala a jeho výsledky mohou vézt k úpravám metodiky měření.

- Zpracování databáze protokolů z měření a určení nejproblémovějších objektů a prvků v jednotlivých energetických celcích.

Databáze měřených protokolů byla analyzována a práce obsahuje výsledky z této analýzy. Tomuto bodu byla věnována dostatečná péče a věřím, že jeho výsledky mohou sloužit jako zdroj důležitých informací, jak pro majitele kontrolovaných objektů, tak pro další subjekty, které se zajímají o spolehlivost analýzy.

- Simulační řešení problémů kotevních svorek sloužící k objasnění hlavních faktorů vedoucích k jejich velké poruchovosti.

Také tomuto bodu byla věnovaná velká část práce a podařilo se ověřit nejslabší místa tohoto provedení svorek. Z analýz vyplývá, že degradační pochody na svorkách mají elektricko – mechanicko – chemický původ. V práci byly vyhotoveny funkční fyzikální modely, které mohou sloužit i pro další simulace v rámci dalších analýz. Práce upozorňuje na několik možných příčin a naznačuje, jak by k daným problémům mohlo docházet.

## LITERATURA

- [1] Kočár, R.: Experimenty s termosnímkou obličejů, Brno 2009
- [2] Svoboda, J.: Nové termografické systémy FLIR Systems, Praha 2007
- [3] Newreport. [online] 2010. Dostupný z WWW:  
<http://newport.cz/techinfo/emiskovy.html>
- [4] Newreport. [online] 2010. Dostupný z WWW:  
<http://newport.cz/techinfo/emisnekovy.html>
- [5] Fluke. [online] 2010. Dostupný z WWW:  
[http://fluke.cz/comx/show\\_product.aspx?locale=czcs&pid=37822](http://fluke.cz/comx/show_product.aspx?locale=czcs&pid=37822)
- [6] Flir systems: ThermalCAM™ E45 Uživatelská příručka. Únor 2006. No. 1558044 Rev. A156
- [7] ČSN EN 60034-1 Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti. Říjen 1999. 68 s.
- [8] What is a Blackbody and Infrared Radiation?, [online] 2010. Dostupný z WWW:  
[http://www.electro-optical.com/eoi\\_page.asp?h=Atmospheric Absorption](http://www.electro-optical.com/eoi_page.asp?h=Atmospheric Absorption)
- [9] ČSN 33 2000-5-523 Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení. Kapitola 52: Výběr soustav a stavba vedení. Oddíl 523: Dovolené proudy. Únor 1994. 102 s.
- [10] Hrabčík, M., Goňo, R.: Thermo diagnostic and application problems. Elnet 2008
- [11] Nováček, J.: Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30, Brno 2007.
- [12] Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I., Brno 1985
- [13] Modest, M.F.: Radiative heat transfer ,Burlington,Massachusetts 2003
- [14] White, F.M.: Heat Transfer, Addison-Wesley, Reading, MA, 1984
- [15] Schmidt, E., Eckert, E. R. G.: Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, vol. 7,1935.
- [16] Drude, P.: Annalen der Physik, vol. 39, 1890.
- [17] Hagen, E., Rubens, H.: Metallic reflection. Annalen der Physik, vol.1, no.2, 1900.
- [18] Ordal, M. A., Long, L. L., Bell, R. J., Bell, S. E., Alexander, R. W., Ward, C. A.: Optical properties of methyle Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in infrared and far infrared. Applied Optics, vol. 22, no. 7, 1983.
- [19] Lysenko, V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot.Ben, Praha 2005.
- [20] Wikipedie. [online] 2011. Dostupný z WWW:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotorezistor>
- [21] Mišek, J.,Kratěna, L.: Optoelektronika. Populární přednáška o fyzice sv. 29, SNTL, Praha 1979
- [22] Schneider, H., Walther, M., Schönbein, C., Rehm, R., Fleissner, J., Pletschen, W., Braunstein, J., Koidl, P., Weimann, G., Zielgler, J., Cabanski, W.: OWIP FPAs for high-performance thermal imaging. Physica E: Low-dimensional System and Nanostructures, Volume 7, April 2000.
- [23] Dehui, X., Xiong, B., Wang, Y.: Modeling of Front-Etched Micromachined Thermopile IR Detectot by CMOS Technology. Journalo of microlektromechnical systéme, Vol. 19,. No.6, December 2010
- [24] Smith, B., Vanderbeek, A., Amon, C.: Simultaneous electro-thermal test method for pyroelectric microsensors. Thernak a Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, IThERM, June 2006
- [25] InfraTec. [online] 2011. Dostupný z WWW:  
[http://www.infratec.de/index.php?id=592&no\\_cache=1&L=5%2F](http://www.infratec.de/index.php?id=592&no_cache=1&L=5%2F)
- [26] Alessandrello, A., Brofferio, C., Camin, D., V., Cremonesi, O., Giuliani, A., Pavan,

- M., Pessina, G., Previtali, E.: An electrothermal model for large mass bolometric detector. IEEE Transactions on nuclear science, Vol. 40, NO. 4, August 1993
- [27] Xiqu, Ch., Keling, W.: A new bias equalization for microbolometer array. Photonics and Optoelectronics, SOPO, June 2010
- [28] Termokamera. [online] 2011. Dostupný z WWW: [http://www.termokamera.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=4&Itemid=9](http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9)
- [29] Ketkar, Satish, P.: Numerical thermal analysis, ASME, New York 1999
- [30] Hrabčík, M., Sikora, T.: Thermo diagnostic and its usage at the Department of Electrical Power Engineering. In sborník konference ELNET 2007, Ostrava: VŠB - TU, 2007, 9, ISBN 978-80-248-1681-4
- [31] Král, V.: Optimalizace rezistenčního nepřímého ohřevu. Disertační práce, Ostrava 2008.
- [32] Flir systems: ThermalCAM Reporter. [online] 2011. Dostupný z WWW: <http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/content/?id=11370>
- [33] PTC: Mathcad. [online] 2011. Dostupný z WWW: <http://www.ptc.com/products/mathcad/>
- [34] Michna, Š., Lukač, I., Očenášek, V., Kořený R., Drápala, J., Schneider, H., Miškuřová, A. a kol.: Encyklopedie hliníku. Prešov 2005.
- [35] Katedra výrobních technologií a managementu: Vlastnosti Al a jeho slitin. [online] 2011. Dostupný z WWW: [http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/vlastnosti\\_AL\\_a\\_jeho\\_slitin.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/vlastnosti_AL_a_jeho_slitin.pdf)
- [36] Technical resources for manufacturing Professional. [online] 2011. Dostupný z WWW: <http://www.carbidedepot.com/formulas-frictioncoefficient.htm>
- [37] Mechanical, Industrial and Technical Calculations: Předepjatý šroubový spoj. [online] 2011. Dostupný z WWW: <http://www.mitcalc.com/doc/boltcon/help/cz/boltcontxt.htm>
- [38] Pozemní stavitelství: Šroubové spoje. [online] 2011. Dostupný z WWW: <http://www.pozemni-stavitelstvi.wz.cz/dkk24.php>
- [39] Nord-Lock: Nord-Lock steel washers. [online] 2011. Dostupný z WWW: [http://www.nord-lock.com/news/NL\\_Dimensions&Torque\\_EN-METRIC\\_UNC\\_201104.pdf](http://www.nord-lock.com/news/NL_Dimensions&Torque_EN-METRIC_UNC_201104.pdf)

## PUBLIKACE DISERTANTA

1. Hrabčík, M., Sikora, T.: Thermo diagnostic and its usage at the Department of Electrical Power Engineering. In *sborník konference ELNET 2007*, Ostrava:VŠB - TU, **2007**, 9, ISBN 978-80-248-1681-4
2. Hrabčík, M., Goňo, R., Král, V.: Thermo diagnostic and application problems. In *Proceedings of ELNET 2008*. Ed. Václav Snášel, Ostrava:VŠB-TU, **2008**, 8, ISBN 978-80-248-1875-7
3. Hrabčík, M.: Thermo diagnostic and practical using . In *sborníku konference WOFEX*. Ed. Václav Snášel, Ostrava:VŠB-TU, **2008**, 94-99, ISBN 978-80-248-1807-8
4. Hrabčík, M., Goňo, R.: Evaluation of faults detected by thermo diagnostic . In *sborníku konference WOFEX*. Ed. Václav Snášel, Ostrava:VŠB-TU, **2009**, 48-52, ISBN 978-80-248-2028-6
5. Goňo, R., Hrabčík, M.: Problematic Largest Hydropower Project. In *Proceedings of ELNET2009*, Ostrava:VŠB-TUO, **2009**, 1-8, ISBN 978-80-248-2146-7
6. Hrabčík, M., Goňo, R., Král, V.: Postprocessing of Measurement Protocol of Thermo Diagnostics. In *Proceedings of ELNET2009*. Ed. Václav Snášel, Ostrava:VŠB-TUO , **2009**, 17-23, ISBN 978-80-248-2146-7
7. Hrabčík, M., Goňo, R.: Thermodiagnostic problems and use cameras Flir E45 and Fluke Ti20. In *Sborník konference EPE 2009*, Ostrava:VŠB-TUO, **2009**, 120-124, ISBN 978-80-248-1947-1
8. Hrabčík, M., Goňo, R., Rusek, S.: Wind turbine cylindres with spiral fins. In *8th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2009 Karpacz*. Ed. H. Schwarz, Z. Leonowicz, Cottbus:Technical University of Cottbus , **2009**, 45-48, ISBN 978-3-940471-10-9
9. Hrabčík, M., Goňo, R.:Analysis of issues in long-term thermovision measurements in distribution networks. In *Sborník konference EPE 2010*, Brno:VUT, **2010**,721-725, ISBN 978-80-214-4094-4
10. Hrabčík, M., Goňo, R.: Processing of databases of thermal analyses in electric power networks. In *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2010*. Praha:Wroclaw University of Technology, **2010**, 144-147, ISBN 978-1-4244-5374-0
11. Hrabčík, M., Goňo, R.: Dead-end Clamps. In *Proceedings of ELNET 2010*, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, **2010**, 7-12, 6, ISBN 978-80-248-2349-2
12. Hrabčík, M., Goňo, R.: Issues of Dead-end clamps . In *Sborník konference EPE 2011*, Ostrava:VŠB-TUO, **2011**, ISBN 978-80-248-2393-5

## SEZNAM PŘÍLOH

1. Soubor Mathcad „teploty.xmcd“ (Na CD. Jsou zde uloženy procedury, funkce a postup získání regresní funkce i s daty.)
2. Adresář s maticemi teplot „Tepoty matice“ (Na CD. Jednotlivé soubory pro jednotlivé kovy.)
3. Katalogový list starší svorky
4. Protokol ze simulace ANSYS na nové svorce ... provozní simulace, soubor s názvem „25stupnu\_prubehproudu.wbpj“
5. Protokol ze simulace ANSYS na staré svorce ... provozní simulace, soubor s názvem „starasvorka25stupnu.wbpj“
6. Protokol ze simulace ANSYS na nové svorce ... simulace svárů, soubor s názvem „25stupnu\_svary.wbpj“
7. Protokol ze simulace ANSYS na staré svorce ... simulace svárů, soubor s názvem „staraSvorkavaryFinal.wbpj“
8. Protokol ze simulace ANSYS na nové svorce ... simulace mechanického zatěžování pro případ 1, soubor s názvem „MechanikaNovaLM.wbpj“
9. Protokol ze simulace ANSYS na staré svorce ... simulace mechanického zatěžování pro případ 1, soubor s názvem „MechanikaStara.wbpj“
10. Protokol ze simulace ANSYS na nové svorce ... simulace mechanického zatěžování pro případ 2, soubor s názvem „MechanikaNovaLMR.wbpj“
11. Protokol ze simulace ANSYS na staré svorce ... simulace mechanického zatěžování pro případ 2, soubor s názvem „MechanikaStaraR.wbpj“